



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

역시물레이션 기법을 이용한 무인잠수정의 운동성능 해석에 대한 연구

A Study on Dynamic Performance of Underwater Vehicle
using Inverse Simulation Method

지도교수 김 준 영

2014년 12월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

변 승 우



공학박사 학위논문

역시물레이션 기법을 이용한
무인잠수정의 운동성능 해석에 대한 연구

A Study on Dynamic Performance of Underwater Vehicle
using Inverse Simulation Method

지도교수 김 준 영



2014년 12월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

변 승 우

本 論文을 邊承優의 工學博士 學位論文으로 認佳함.

위원장 최 형 식



위 원 유 삼 상



위 원 이 승 건



위 원 최 중 락



위 원 김 준 영



2014년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	x

제 1 장 서 론

1.1 연구배경	1
1.1.1 무인잠수정의 종류	2
1.1.1.1 자율무인잠수정	6
1.1.1.2 원격조종무인잠수정	7
1.1.1.3 기타 수중로봇	9
1.1.2 무인잠수정의 역사	10
1.1.3 기뢰대항전을 위한 무인잠수정	14
1.2 연구목표	19
1.3 논문구성	20

제 2 장 무인잠수정의 수학 모델

2.1 무인잠수정 모델링	21
2.2 무인잠수정의 수학모델	22
2.2.1 좌표계(Coordinate System)	22
2.2.2 강체동역학(Rigid Body Dynamics)	24
2.2.3 동역학(Kinetics)	26

2.2.3.1 강체에 작용하는 힘(Rigid Body Forces and Moments)	26
2.2.3.2 유체력(Hydrodynamic Forces and Moments)	28
2.2.3.3 질량이동장치 모델링(Moving Mass System Modeling) ..	31
2.2.3.5 추진기 모델링(Thruster Modeling)	33
2.2.3.6 운동방정식(Equations of Motion)	34
2.3 무인잠수정의 계수추정 방법	36
2.3.1 경험식에 의한 방법	36
2.3.2 시험에 의한 방법	36
2.3.3 전산유체역학을 이용한 방법	38
2.4 CFD를 이용한 무인잠수정의 계수 추정	39

제 3 장 역시뮬레이션을 이용한 무인잠수정의 운동성능 확인

3.1 역동역학과 역시뮬레이션	50
3.2 역동역학 시뮬레이션 설계	54
3.2.1 전진방향 운동에 필요한 추력 분석	56
3.2.2 선회운동에 필요한 추력 분석	61
3.2.3 잠항에 필요한 추력 및 질량이동장치 이동거리 분석	66
3.2.4 수심방향 운동에 필요한 수직방향 추진기 추력 분석	71
3.3 역동역학 시뮬레이션의 적용	74

제 4 장 무인잠수정의 자세제어를 위한 제어기 설계

4.1 운동성능 해석	75
4.2 제어기 설계	79
4.2.1 PID 제어기 설계	80
4.2.1.1 좌·우 추진기를 이용한 속도제어 및 방향각 제어 ...	82
4.2.1.2 수직추진기를 이용한 수심제어	83
4.2.1.3 질량이동장치를 이용한 피치각제어	83
4.2.2 퍼지-PID 제어기	84
4.2.2.1 퍼지제어의 개요	84
4.2.2.2 퍼지-PID 제어기 설계	87
4.3 경로 추종 시뮬레이션	97
4.3.1 시뮬레이션 조건	97
4.3.1.1 방향각 추종 방법	97
4.3.1.2 피치각 추종 방법	100
4.4 경로추종 시뮬레이션 결과	101
4.4.1 퍼지-PID 제어기를 이용한 경로추종 시뮬레이션	101

제 5 장 결 론

5.1 결론	108
5.2 추후연구	109

참고문헌	110
------------	-----

List of Tables

Table 1.1 Features of Expendable Unmanned Mine Disposal Vehicles ..	18
Table 2.1 The notation of SNAME for marine vessels	23
Table 2.1 Number of grids due to test case	45
Table 2.2 Total drag calculation on 3.5 kts	47
Table 2.3 Total drag calculation on 7 kts	47
Table 2.4 Total drag calculation on 7 kts	48
Table 4.1 Parameters and hydrodynamic coefficients of Minesniper	75
Table 4.2 Fuzzy control rules for depth gain K_p	93
Table 4.3 Fuzzy control rules for depth gain K_d	93
Table 4.4 Fuzzy control rules for pitch gain K_p	94
Table 4.5 Fuzzy control rules for pitch gain K_i	94
Table 4.6 Fuzzy control rules for pitch gain K_d	94
Table 4.7 Fuzzy control rules for heading gain K_p	95
Table 4.8 Fuzzy control rules for heading gain K_d	95
Table 4.9 Fuzzy control rules for velocity gain K_p	96
Table 4.10 Fuzzy control rules for velocity gain K_i	96
Table 4.11 Fuzzy control rules for velocity gain K_d	96

List of Figures

Fig. 1.1 UUV Master Plan Vision(US Navy, 2004)	2
Fig. 1.2 Classifications of Underwater Vehicle	3
Fig. 1.3 ROV working on the leaking riser pipe	4
Fig. 1.4 Military purpose underwater vehicles	5
Fig. 1.5 Manta Test Vehicle 2 conceptual design	5
Fig. 1.6 Types of Autonomous underwater vehicles	7
Fig. 1.7 Species of Remotely operated vehicles	8
Fig. 1.8 Bio-mimicking Underwater Robots	9
Fig. 1.9 Underwater construction robot concept	9
Fig. 1.10 The Bushnell Turtle submarine	10
Fig. 1.11 The first AUV, Whithead(1868)	11
Fig. 1.12 The first ROV, POODLE(1953)	12
Fig. 1.13 The CRUV ROV(1966)	12
Fig. 1.14 U.S. ship casualties due to missiles, torpedoes, aerial attack, and mines during military conflicts(1950-2000)	15
Fig. 1.15 Mission proportion of Military UUVs	16
Fig. 2.1 Body-fixed and earth-fixed reference frame for UUV	23
Fig. 2.2 Configuration of mass moving system for pitch control	32
Fig. 2.3 Planar Motion mechanism	37

Fig. 2.4 PMM test motions	37
Fig. 2.5 Rotating-Arm mechanism	38
Fig. 2.6 CFD models for hydrodynamic coefficients calculation	40
Fig. 2.7 Domain size for CFD calculation	41
Fig. 2.8 Domain meshes with prism layer for CFD analysis	42
Fig. 2.9 Structured meshes for CFD analysis	43
Fig. 2.10 Structured meshes around thruster	43
Fig. 2.11 Grid strategy of each region	44
Fig. 2.12 Differences of grid distribution due to model shape	44
Fig. 2.13 Convergence history of CFD model 4-2	45
Fig. 2.14 Pressure distribution of CFD Model 4-2	46
Fig. 2.15 Axial surge velocity distribution of CFD Model 4-2	46
Fig. 3.1 Dynamic systems simulation types and identification	51
Fig. 3.2 Mass-spring-dashpot model	51
Fig. 3.3 Forward and inverse simulation	52
Fig. 3.4 Operation concept of mine disposal vehicle	54
Fig. 3.5 Designed velocity profile for surge motion	56
Fig. 3.6 Position trajectory for surge motion	57
Fig. 3.7 Velocity profiles for surge motion	58
Fig. 3.8 Acceleration profiles for surge motion	58
Fig. 3.9 Generated propulsion force of port thruster	60
Fig. 3.10 Generated propulsion force of starboard thruster	60

Fig. 3.11 Designed heading angle trajectory for yaw motion	61
Fig. 3.12 Heading angle for yaw motion	62
Fig. 3.13 Yaw rates for yaw motion	63
Fig. 3.14 Yaw angular rate for yaw motion	63
Fig. 3.15 Generated propulsion force of port thruster	65
Fig. 3.16 Generated propulsion force of port thruster	65
Fig. 3.17 Designed depth for heave motion	67
Fig. 3.18 Designed pitch angle for pitch motion	67
Fig. 3.19 Depth and pitch angles for submerge motion	68
Fig. 3.20 Heave velocities and pitch rates for submerge motion	69
Fig. 3.21 Heave accelerations & pitch angular accelerations for submerge motion	69
Fig. 3.22 Generated position of inner movable mass	70
Fig. 3.23 Depth for heave motion	71
Fig. 3.24 Velocity for heave motion	72
Fig. 3.25 Acceleration for heave motion	72
Fig. 3.26 Generated propulsion force of vertical thruster	73
Fig. 3.27 Comparison of designed and maximum values of input system	74
Fig. 4.1 Simulator program for UUV simulation	76
Fig. 4.2 Simulation of submerging trajectory	77
Fig. 4.3 Linear velocities of simulation results	77
Fig. 4.4 Angles of simulation results	78

Fig. 4.5 Mass position of simulation results	78
Fig. 4.6 Block diagram of PID controller	81
Fig. 4.7 Basic structure of a fuzzy logic controller	85
Fig. 4.8 Block diagram of Fuzzy-PID Controller	87
Fig. 4.9 Input membership function for Depth e, \dot{e}	88
Fig. 4.10 Input membership function for Pitch e, \dot{e}	88
Fig. 4.11 Input membership function for Heading e, \dot{e}	88
Fig. 4.12 Input membership function for Velocity e, \dot{e}	89
Fig. 4.13 Output membership function for depth control gain K_p, K_d, K_i	90
Fig. 4.14 Output membership function for pitch control gain K_p, K_d, K_i	91
Fig. 4.15 Output membership function for heading control gain K_p, K_d	91
Fig. 4.16 Output membership function for control gain K_p, K_d, K_i	92
Fig. 4.17 The kinematics of the horizontal LOS guidance system	99
Fig. 4.18 The kinematics of the vertical LOS guidance system	100
Fig. 4.19 Desired way-point for trajectory tracking	101
Fig. 4.20 Simulation results through trajectory tracking(3D)	102
Fig. 4.21 Simulation results through trajectory tracking(velocity)	103
Fig. 4.22 Simulation results through trajectory tracking(depth)	104
Fig. 4.23 Simulation results through trajectory tracking(pitch)	105

Fig. 4.24	Simulation results through trajectory tracking(mass position)	105
Fig. 4.25	Simulation results through trajectory tracking(heading)	106
Fig. 4.26	Simulation results through trajectory tracking(thrust)	107



A Study on Dynamic Performance of Underwater Vehicle using Inverse Simulation Method

Byun, Seung Woo

Department of Material Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

An UUV (Unmanned Underwater Vehicle) is commonly used in hazardous fields such as oceanographic studies, sub-sea works, and military applications of ISR (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance), ASW (Anti-Submarine Warfare) and MCM (Mine Countermeasure).

This dissertation mainly focuses on the development of a dynamic control system for the UUV equipped with three dedicated thrusters and a mass moving system. The dynamic control system is constructed based on the inverse simulation method which includes a mathematical model with the six degrees of freedom (6-DOF) consisted of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients, which can be obtained from empirical formula, CFD (Computational Fluid Dynamics) and PMM (Planar Motion Mechanism)

- x -

test.

To analyze the dynamic performance, the inverse simulation method based on inverse dynamics is utilized to calculate the input thrust force of three thrusters and the eligible distance of the mass moving system of the UUV under the specific trajectory and acceleration profiles developed in this dissertation.

Moreover, the evaluation on the proposed method has been carried out in terms of the effectiveness of thrust power consumption and the deviation from the desired speed, heading, pitch and depth. In order to analyze the dynamic performance of the UUV, the conventional simulation program also designed. The PID and Fuzzy-PID controller is applied after this complicated feedback system. The thruster dynamics and mass moving system is also incorporated in to the control system design. The performance analysis is performed in the navigation control by the operation concept that means specific predefined trajectory. The effectiveness of the control methods are demonstrated by simulation for a typical underwater mission. It is demonstrated numerically that the navigation system together with controller guides the vehicle to follow the desired trajectory which maintains the speed, heading, pitch and depth with a sufficient accuracy.

KEY WORDS: Unmanned underwater vehicle 무인잠수정; Inverse dynamics 역동역학; Controller design 제어기 설계.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

육상에 매장된 에너지 및 광물 자원이 고갈되고, 대도시에서 근접한 연안공간이 제한되어 앞으로 해양 자원 및 공간 개발은 인류에게 필연적이다. 하지만 해양은 수평면의 범위가 넓고 수심에 따른 변화가 중요한 3차원 공간이란 특성을 지니고 있다. 이처럼 광활한 해양을 탐사하기 위해서는 효율적으로 수행할 수 있는 장비와 인력이 투입되어야 하므로 막대한 자금이 필요하고, 이를 위한 다양한 해양장비 및 시설에 대한 연구가 필요하다. 그 중에서 무인잠수정은 해양의 열악한 환경을 극복하여 인간이 다가갈 수 없는 곳에서 다양한 활동을 하기 위하여 1990년대부터 활발하게 연구되기 시작하였다. 현재까지 개발된 무인잠수정은 열악한 해양환경에서 수중탐사, 해저지형조사, 해저자원탐사, 해양환경 조사 및 감시 그리고 해난구조 등의 많은 분야에 사용되고 있으며, 군사적 목적으로의 사용도 점차 확대되어가고 있다(최중락, 2013). 군사적 목적으로는 Fig. 1.1의 미 해군 UUV Master Plan에서 보듯이 감시, 정찰 분야와 대기뢰전(MCM: Mine Countermeasure operation) 분야 등에 많이 사용되고 있으며, 최근에는 전투용 무인잠수정에 대한 연구도 계속되고 있다(US Navy, 2004).

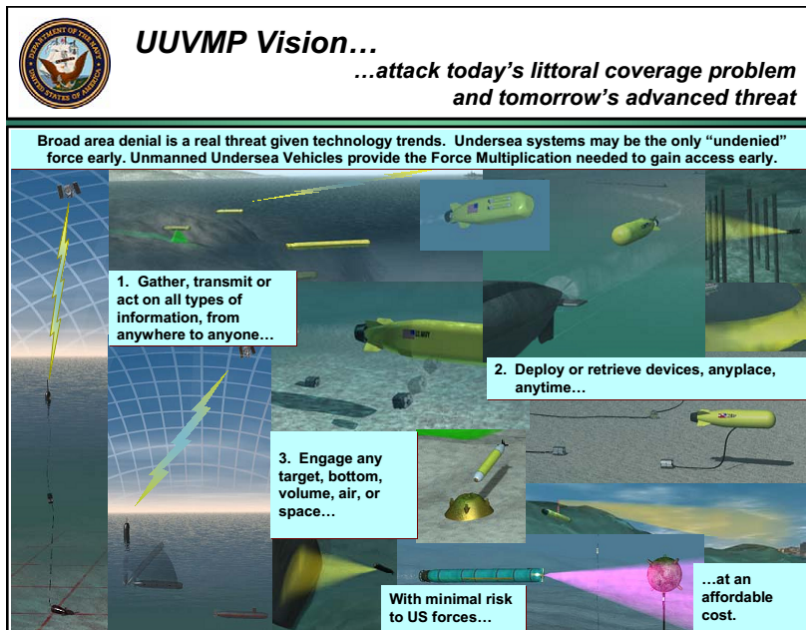


Fig. 2.1 UUV Master Plan Vision(US Navy, 2004)

1.1.1 무인잠수정의 종류

무인잠수정(UUV: Unmanned Underwater Vehicle)은 운용방식에 따라 Fig. 1.2와 같이 크게 자율무인잠수정(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)과 원격조종무인잠수정(ROV: Remotely Operated Vehicle)으로 구분된다. 이 외에도 AUV와 ROV의 중간형태인 Semi-AUV/Semi-ROV, 생체모방형로봇, 수중글라이더 등 다양한 형태의 무인잠수정이 개발되고 있다. 전 세계적으로 약 2~300여 종의 무인잠수정이 개발되었으며, 이 중에 일부분이 상용화되어 실제 환경에서 운용되어지고 있다. 무인잠수정 이외에도 무인수상정도 항만 감시 및 방어 등의 목적으로 개발되어 운용되고 있다. 무인잠수정은 1990년대 이후부터 전 세계적으로 꾸준히 개발이 증가되고 있으며, 연구용이외에 상업적인 용도로의 운용도 증가되고 있는 추세이다. 무인잠수정은 크기와 용도에 따라 분류되며, 소형의 Man-portable 급 무인잠수정부터 장시간 운용이 가능한 대형급의 무인잠수정까지 다양하게 개발되고 있다.

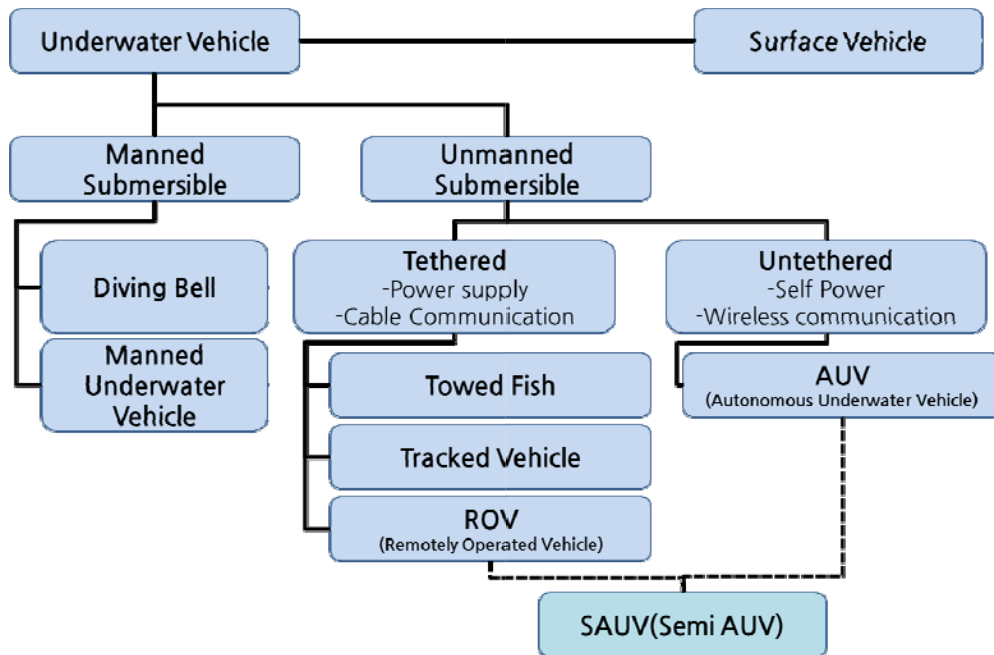


Fig. 1.3 Classifications of Underwater Vehicle

무인잠수정은 해양조사 및 탐사, 군사적 분야와 상업적인 용도로 많이 사용되고 있으며 특히, 유전 탐사와 시추선의 설치 및 유지보수를 위해 대형 정유 회사에서 가장 많이 사용하고 있다. AUV를 이용하여 해저지형 및 매장된 원유를 찾고, 유전 개발을 위한 플랫폼 설치 및 유지 보수에는 작업이 가능한 ROV 형태의 수중로봇이 이용되고 있다. 최근 Subsea에 대한 관심이 증가하면서 심해에서 작업이 가능한 ROV들이 많이 개발되어 운용 중이다. Fig. 1.3은 지난 2010년 미국 텍사스의 멕시코만 수심 1500m에서 ROV가 심해 유정을 차단하는 모습이다. 이렇듯 무인잠수정은 인간이 작업할 수 없는 극한영역에서의 사용이 계속 증가하고 있다.

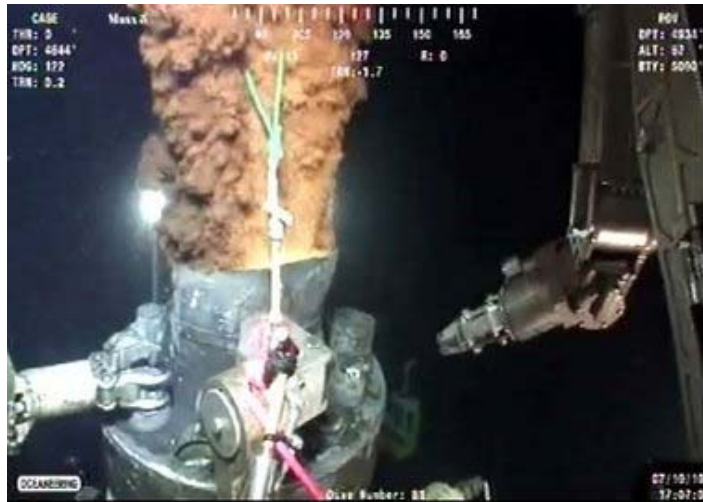


Fig. 1.4 ROV working on the leaking riser pipe

(Source: : <http://edition.cnn.com/2010/US/07/10/gulf.oil.disaster/>)

또한, Fig. 1.4와 같이 다양한 형태의 군사적인 목적의 무인잠수정의 개발 및 사용도 점차 증가하고 있는 추세이다. 군사적인 목적으로 사용되는 무인잠수정은 감시/정찰, 대기뢰전, 대잠수함전 등의 분야에서 다양하게 운용되고 있으며, AUV 형태의 무인잠수정은 주로 장거리, 장기간 동안 운항하면서 감시/정찰 및 정보 수집 등의 용도로 사용되고 있으며, ROV 형태의 무인잠수정은 특정 구역에 대한 기뢰소해, 인명구조 등의 용도로 사용되고 있다.

Fig. 1.4 (a)는 REMUS AUV로 전세계 적으로 가장 많이 사용되고 있는 자율 무인잠수정이다. 이 잠수정은 1990년대 초반에 개발되어 해양환경감시 및 조사 등에 이용되기 시작하였으며, 2003년 이라크 전쟁에서 해저에 부설된 기뢰를 찾는 목적으로 사용되면서 그 명성이 높아지기 시작했다. REMUS는 현재 REMUS 100부터 REMUS 6000까지 다양한 모델이 개발되어 운용되고 있다. Fig. 1.4(b)는 Bluefin-21기반의 Knifefish UUV이며, 연안의 대기뢰전을 위한 무인잠수정이다. 연안에서 운용되는 LCS(Littoral Combat Ship)에 탑재되어 기뢰를 탐지하는 임무를 수행하는 잠수정이다, 열악한 해양환경을 극복하고 장기간 임무를 수행할 수 있도록 제작되었으며, 함정의 대기뢰전 시스템과 연동되어 탐지된 기뢰정보를 전달하는 임무를 수행하게 된다. Fig. 1.4(c)는 독일 Atlas Elektronik사에서 개발한 SeaFox 잠수정으로 유선으로 연결되어 플랫폼 내부에

장착된 폭약을 이용하여 해양의 기뢰를 제거하는 임무를 갖는다. SeaFox는 미국, 영국 등 해군에서 대기뢰전을 위한 용도로 많이 사용되고 있으며, 일반적으로 선박에서 진수되어 운용이 되지만 헬기에서 진수되는 형태도 개발되어 운용되고 있다. Fig. 1.4 (d)는 NUWC(Naval Undersea Warfare Center) 개발 중인 MANTA UUV의 초기 설계 개념이다. 잠수함에 부착되어 운용되는 개념으로 설계하였다. 2000년에 MTV(Manta Test Vehicle)을 개발하여 실험역 실험을 수행하였고(Menozzi *et al.*, 2000), 현재는 초기의 형태에서 조금 더 발전된 형태로 Fig. 1.5와 같은 형태의 MTV 2 잠수정에 대한 연구가 진행 중이다. MTV 2는 내부에 어뢰를 탑재할 수 있는 공간을 확보하고 있어, 장거리 무기체계로서의 임무를 담당하게 된다.

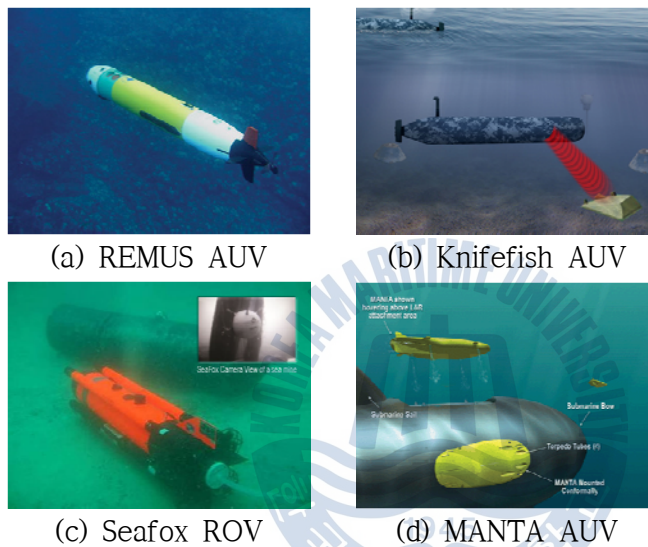


Fig. 1.5 Military purpose underwater vehicles

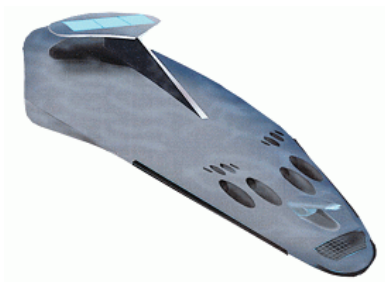


Fig. 1.6 Manta Test Vehicle 2 conceptual design

군사적으로 사용되는 무인잠수정 중에서 특히 감시/정찰 및 대기뢰전을 위해 군사적인 목적으로 개발된 무인잠수정은 미국을 중심으로 유럽, 일본 등에서 주로 개발이 되었으며, 우리 해군에서도 감시정찰용 AUV와 대기뢰전을 위한 MDV(Mine Disposal Vehicle)가 개발 운용되고 있다. 국내에서도 미국의 UUV Master Plan을 바탕으로 미래 해군의 전투력 향상을 위한 커뮤니티가 조성되어 해군의 무인화 전략을 위한 다양한 노력들이 진행되고 있으며, 무인잠수정을 비롯하여 무인수상정(USV: Unmanned Surface Vehicle)과 수중글라이더까지 다양한 무인체계들이 개발되어 향후의 전장에서 이용될 것이다.

1.1.1.1 자율무인잠수정

자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle)은 모선과 연결되는 케이블이 없어 장거리 운용에 적합하고, 모선이 들어가기 힘든 천해에서 매우 효과적으로 운용이 가능하다. AUV는 자체 전원을 탑재하고 자율능력을 가지고 있기 때문에 운용자의 개입을 최소화 하여 운용이 가능한 장점이 있다. 하지만 자율운항을 위해 컴퓨터와 다양한 센서를 내장하고 있기 때문에 선체의 크기에 따른 탑재 장비의 제한과 배터리 탑재 능력의 제한으로 인한 운용시간의 제약이 뒤따른다. 이러한 운용시간의 제약을 극복하기 위해서는 AUV의 선형 설계가 중요하다. AUV의 선형은 어뢰나 잠수함과 같은 실린더 형상뿐만 아니라 안정성 향상을 위하여 다양한 선형이 있지만 어떠한 형상이든 설계 시 센서나 임무장비의 탑재를 고려하여 선체에 작용하는 유체저항을 최소화하는 선형을 설계하여 추진력을 최적으로 사용할 수 있어야 한다. 왜냐하면 탑재된 제한된 에너지원으로 가능한 최대의 수중체재를 해야 되기 때문이다. 최근에는 AUV에도 필요 시 모선과 케이블을 연결하여 실시간으로 데이터를 전송하고, 로봇팔 등을 장착하여 원격으로 부가적인 임무를 수행하기도 한다. Fig. 1.6 은 대표적인 AUV의 예를 보여주고 있다. 대부분 장거리 주행을 위해 어뢰형상의 선형을 가지고 있으며, 특수한 목적을 위해 Flat fish 타입과 국한된 지역에서의 작업을 위한 호버링(Hovering) 타입의 잠수정도 개발되어 운용 중이다.

그리고 AUV의 한 종류인 수중 글라이더는 배터리 사용을 최소화하여 장기간 동안 수중의 수직 환경을 사용자가 지정한 경로 상에서 부력제어를 통해 수직

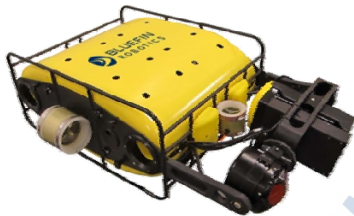
운동을 발생시켜 장기 관측이 가능한 시스템이다(Stommel, 1989). 부력의 변화에 의해 발생하는 낙하 에너지를 좌우에 달려있는 날개와 내부 무게추의 전·후진, 좌우 운동을 이용한 중심이동으로 전진 및 좌우 회전력을 얻어 원하는 지점으로 이동하는 메커니즘을 가지고 있다. 그러나 기존 모터를 사용하여 추진하는 일반적인 자율무인잠수정과는 달리 부력중심의 이동, 롤 및 피치 등의 자세 변화 시, 그리고 통신 시에만 배터리를 사용하기 때문에 15일 이상의 장기 운항이 가능하다(박요섭 등, 2012).



(a) Torpedo Type



(b) Flat-fish Type



(c) Hovering Type



(d) Underwater Glider

Fig. 1.7 Types of Autonomous underwater vehicles

1.1.1.2 원격조종무인잠수정

ROV는 모선에서 원격 조종에 의하여 수중 작업을 수행하는 수중로봇이다. 모선과 데이터, 제어 및 전원공급을 위하여 케이블로 연결되어 있으며, 일부 원격조종 수중로봇은 자체전원을 탑재하여 데이터 및 제어 링크만을 필요로 하는 것도 있다. 이러한 수중로봇은 카메라만을 탑재하여 수중촬영 등을 위한 단순한 작업을 수행하는 소형에서부터 수중에서 대형공사인 케이블 매설이나 파이프 설치 등을 수행하는 대형의 수중로봇이 있다. 대부분 여러 개의 추진기(thruster)를 가지고 있으며, 각종 수중센서와 로봇팔을 장착하고 과학탐사(영상, 샘플수집 등)로부터 유전 탐사, 수중구조물 조사 및 난파선 조사까지 다양한

작업을 수행한다. 미국을 비롯하여 프랑스, 영국, 캐나다, 일본, 러시아, 이태리, 중국 등이 ROV를 개발하였으며, 심해를 탐사하는 다양한 형태의 심해용 ROV가 개발되었다. 다음 Fig. 1.7은 대표적인 ROV들이다. 국내에서도 ROV에 대한 연구가 1993년 한국해양연구원에서 CROV를 시작으로 학교와 기업체에서 개발을 진행하였고, 2005년 6,000m까지 탐사할 수 있는 ROV인 해미래를 개발하였다. 미국 우즈홀 해양연구소(WHOI)는 90년대 초반에 6천 미터를 탐사할 수 있는 심해 ROV Jason과 Medea를 개발한 이후 2002년에 6천5백 미터 수심을 탐사할 수 있는 Jason II를 개발하였다(Robert *et al.*, 2004). 일본해양연구센터(JAMSTEC)는 마리아나 해구를 조사할 목적으로 1997년에 1만1천 미터 수심을 탐사할 수 있는 심해 ROV Kaiko를 개발하였으나 2003년 실험 도중 분실하였다(Hiroyasu, 2004). WHOI에서는 심해탐사를 위해 AUV와 ROV가 결합된 형태인 HROV(Hybrid ROV) Nereus를 개발하였다. Nereus는 최대 11,000m 까지 운용이 가능하고 두 가지 모드로 운용되는데, 넓은 지역의 해양조사를 위해서 사용되는 경우에는 AUV모드로 운용되며, 좀 더 자세한 조사를 위해서는 ROV모드로 운용된다(Andrew *et al.*, 2008). 최근에는 WHOI에서 극지방 탐사를 위한 Nereid Under Ice를 개발하여 시험을 진행하고 있다(Whitcomb *et al.*, 2013).

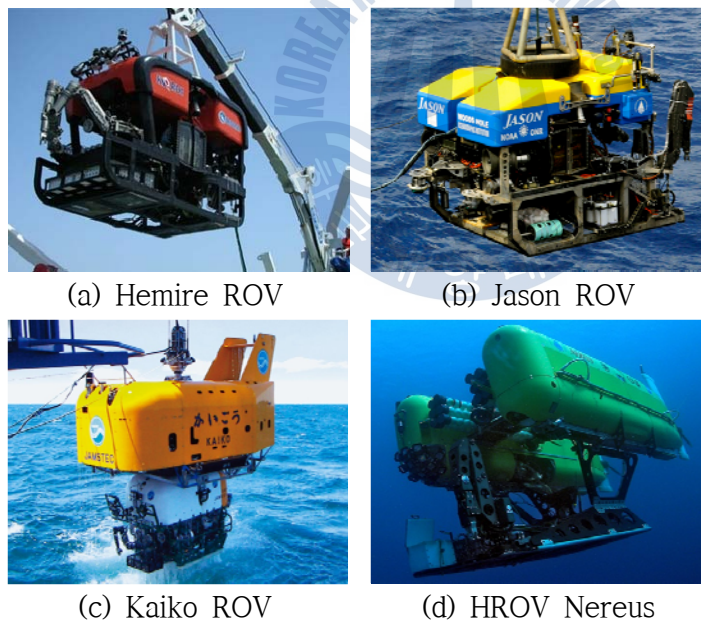


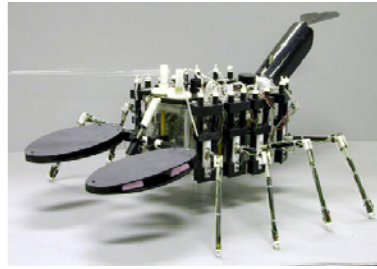
Fig. 1.8 Species of Remotely operated vehicles

1.1.1.3 기타 수중로봇

위에서 소개된 무인잠수정 이외에도 다양한 형태의 수중로봇이 개발되어 운용되고 있다. 대표적으로 생체모방형 수중로봇과 수중건설로봇이 있다. Fig. 1.8과 같은 생체모방형 수중로봇은 물고기, 가재 등의 움직임과 형상을 모방하여 수중에서 움직이는 로봇을 개발하였으며, Fig. 1.9는 수중 건설로봇의 해저작업을 보여주고 있다. 이 외에도 다양한 형태의 수중로봇들이 연구되고 있으며, 극한지역에서의 작업과 탐사를 위해 개발되고 있다.



(a) Robot Fish
-SHOAL/EU



(b) Lobster Robot
-Northeastern Univ.-

Fig. 1.9 Bio-mimicking Underwater Robots

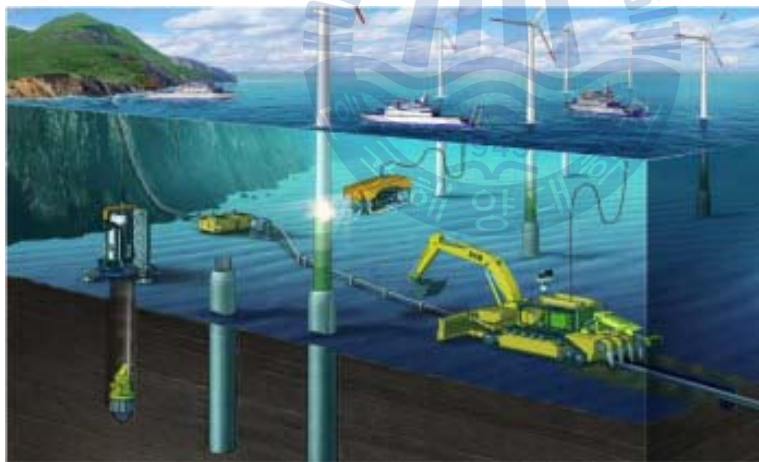


Fig. 1.10 Underwater construction robot concepts

1.1.2 무인잠수정의 역사

최초의 무인잠수정의 개념은 1578년 Bourne에 의해서 시작되었고, Van Drebbel은 1620년에 최초의 잠수함을 개발하였다(Roberts and Sutton, 2006). 미국의 첫 잠수함은 1775년에 David Bushnell과 Ezra가 만든 『Turtle』 이다 (Blidberg, 2001). 이 최초의 잠수함은 1776년에 New York 항에서 최초의 해전에도 참전하게 된다. Fig. 1.10에서 보는 것처럼 『Turtle』은 달걀모양의 나무로 만들어진 잠수함이다. 심도 조절은 운용자가 내부에 설치된 밸러스트 탱크의 밸브를 동작시켜 물을 밀어내는 원리로 동작하며, 잠수함 내부에는 30분 동안 버틸 수 있는 공기가 공급된다. 불행히도 이 최초의 잠수함은 운용자의 체력과 공기 공급의 제한으로 인해 오래 지속되지 못했으며, 이 문제점을 해결하기 위해 유인잠수정, 잠수함관련 기술이 발전하게 되었다.

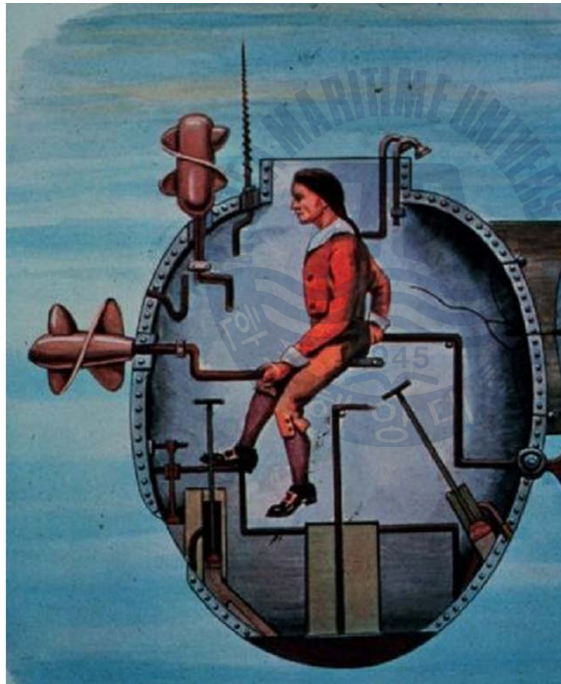


Fig. 1.11 The Bushnell Turtle submarine

이러한 유인 잠수정의 단점을 보완하기 위해 만들어진 것이 무인잠수정(UUV)이다. 최초의 자율무인잠수정(AUV)은 Fig. 1.11에서 보는 것과 같이 1866년에 Robert Whitehead가 자유항주가 가능한 어뢰 형태의 잠수정을 개발하였고 1875년에 실험을 실시하였다(Roberts and Sutton, 2006). 하지만 AUV관련 산업은 1970년대까지는 크게 주목을 받지 못하였다.

Fig. 1.12는 최초의 ROV인 『POODLE』이며, 1953년 드미트리 레비코프가 제작한 것으로 하우징에 카메라를 장착하여 케이블을 이용하여 조종하여 수심 700피트 까지 잠수하였다. Fig. 1.13은 최초의 매뉴플레이터가 장착된 ROV인 CRUV이다. 1966년에 비행기 사고로 해저에 분실한 원자폭탄을 회수하고, 1968년 침몰한 구조선 잠수함을 찾아 인양하면서 심해 탐사장비와 잠수정 기술이 급속히 발전하였다. 이 후 중동전쟁의 여파로 촉발된 석유파동을 겪으면서 70년대 말부터 연근해의 해저 유전이 개발되었으며, 이와 더불어 해저작업이 가능한 상업용 ROV 개발이 이루어지기 시작하였다. 80년대에는 컴퓨터 기술 발전에 힘입어 ROV의 기능이 다양화되었다. 미 해군은 개발초창기부터 무인잠수정에 대한 연구 개발에 많은 노력을 기울였는데, 1990년 6,096m를 잠수하며 해저구난을 지휘할 수 있는 CURVⅢ를 개발하였다.



Fig. 1.11 The first AUV, Whithead(1868)

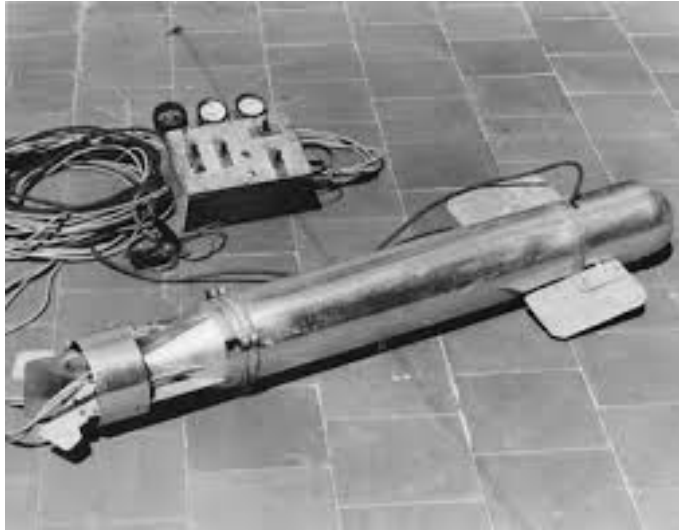


Fig. 1.13 The first ROV, POODLE(1953)



Fig. 1.14 The CRUV ROV(1966)

1990년대 이후 급격하게 기술이 개발되면서 무인잠수정에 대한 연구가 활발해지기 시작했고, 무인잠수정에 필요한 다양한 기술들도 발전 되면서 무인잠수정 기술은 현재에 이르기 까지 많은 발전을 하게 되었다. ROV와 AUV 모두 현재 수준까지 이르는 동안 다양한 형태와 임무를 갖는 잠수정이 개발되었고, 산, 학, 연 다양한 분야에서 개발, 시험되고 있다. 이러한 무인잠수정은 개발 초기

에 운용개념이 정확하게 정의되어야 하며, 개발에 필요한 다양한 기술들에 대한 연구도 선행되어야 한다. 무인잠수정은 조선, 기계, 전자, 통신, 소나 등 여러 요소기술들이 접목되어서 하나의 시스템이 완성되기 때문에 다양한 분야에 대한 기술이 성숙되어 있어야 하며, 목적에 맞는 시스템개발이 필요하고 목적을 달성하기 위한 충분한 성능을 갖는 무인잠수정이 개발될 수 있도록 개발 전 단계에서 많은 노력이 필요하다. 운용개념은 무인잠수정을 어떻게 움직이게 할 것인가에 대한 정의를 내리는 단계이므로, 운용개념이 제대로 설정이 된다면, 무인잠수정의 움직임을 예측하고, 목적에 알맞게 설계하는데 필요한 다양한 요소들을 결정하는데 큰 역할을 한다.



1.1.3 기뢰대항전을 위한 무인잠수정

본 논문에서는 기뢰를 제거하기 위해 사용되는 무인잠수정의 설계와 운용에 필요한 기초가 되는 운동 성능을 해석하고자 한다. 이를 위해 먼저 기뢰전에 대해 살펴보고, 기뢰대항전(대기뢰전)을 위한 무인잠수정의 종류와 특징에 대해서 설명하고자 한다.

기뢰전은 기뢰부설(Mine-Laying)과 기뢰대항전(MCM, Mine Countermeasure)으로 구분되며, 기뢰부설은 기뢰의 제작, 운반, 보관 그리고 항공기, 잠수함, 수상함 등에 의한 부설과정을 의미한다. 대기뢰전은 기뢰부설 자체를 억제하는 공세적 방법과 부설된 기뢰를 제거하는 방어적 방법이 있다(서주노, 2010). 기뢰는 단 한발로 고가의 대형 함정을 파괴하고, 항만이나 항로상 적의 접근을 거부하거나 지연 시킬 수 있는 재래식 무기로 저비용 고효율의 무기체계이다. Fig. 1.14에서 보는 것과 같이 한국전쟁 당시 북한은 50년 이상 된 저급한 기초적인 기뢰를 사용하여 250척 50,000여명에 이르는 미군의 원산상륙을 1주일간이나 저지하였을 뿐 아니라 이의 소해과정에서도 수척의 함정을 손상시킨 바 있다. 1980년대 말의 이란-이라크 전쟁에서는 이란이 부설한 접촉기뢰에 의해 USS Roberts(FFG-58)가, 1990년대 초 걸프전에서도 이라크의 계류 접촉기뢰에 의해 USS Tripoli(LPH-10)와 USS Princeton(CG-59)이 공격당하여 큰 손상을 입었다. 한국전쟁 이후 전쟁 중 손상된 미 해군 함정 18척 중 14척이 기뢰에 의한 손상으로 기뢰가 해군력 운용에 가장 심각한 장애물 중의 하나임을 입증하고 있다(US Navy, 2009).

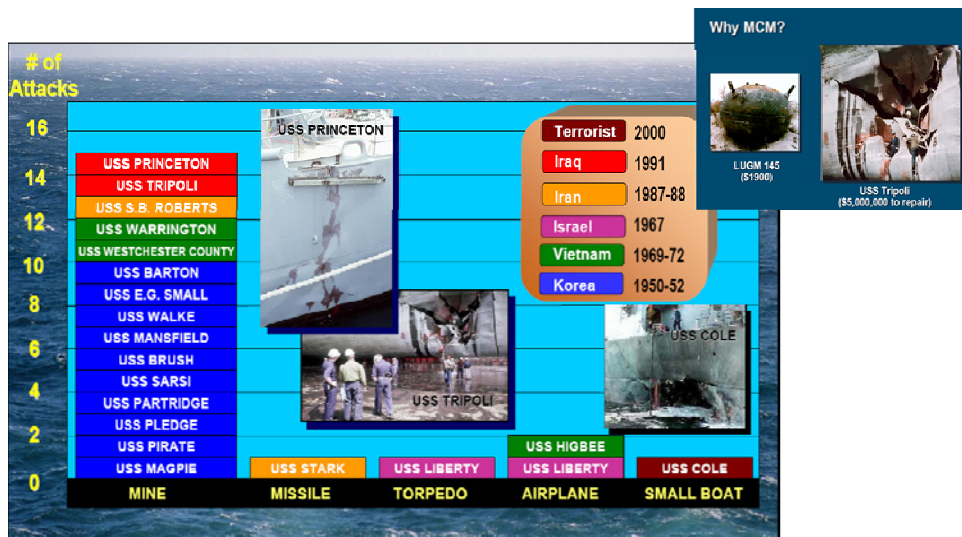


Fig. 1.15 U.S. ship casualties due to missiles, torpedoes, aerial attack, and mines during military conflicts(1950-2000)

기뢰는 저비용 고효율의 무기체계인 동시에 소해에 많은 시간과 노력이 필요한 위험한 무기체계이다. 이러한 기뢰의 위협을 극복하기 위한 수단으로 기뢰대항전의 능력도 다양하게 개발되어지고 있다. 기뢰대항전은 항상 위험을 동반하기 때문에 소해함정을 이용한 소해보다는 무인잠수정을 이용한 소해 방법이 인명을 안전하게 할 수 있는 방법이다. 기뢰를 제거하는 방어적 방법에는 기뢰를 개별적으로 탐색, 식별, 확인 그리고 제거하는 Mine hunting과 기계식 또는 감응기뢰 소해구를 함미에 예인하여 소해구로 계류기뢰의 계류색을 절단하여 기뢰를 부상시켜 폭발하거나 복합신호를 이용하여 기뢰를 폭발시키는 Mine sweeping 방법이 있다. 이를 위해 다양한 형태의 기뢰소해용 무인잠수정이 개발되어 운용되고 있으며, 우리나라 해군에서도 기뢰제거용 MDV(Mine Disposal Vehicle)을 운용하고 있다(이종무 외, 2011). Fig. 1.15를 보면 1994년부터 2010년까지 군사용으로 개발된 총 58종의 무인잠수정의 임무 비율을 분석한 것으로 기뢰대항전(MCM)에의 무인잠수정 활용이 21.5%로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 감시정찰(ISR)과 해양정보수집(HYD)과 같은 광의의 기뢰대항전 관련된 임무를 포함하면 군사용 무인잠수정 임무의 55.4%가 기뢰대항전과 직·간접적으로 관련됨을 보여주고 있다(이기영, 2011).

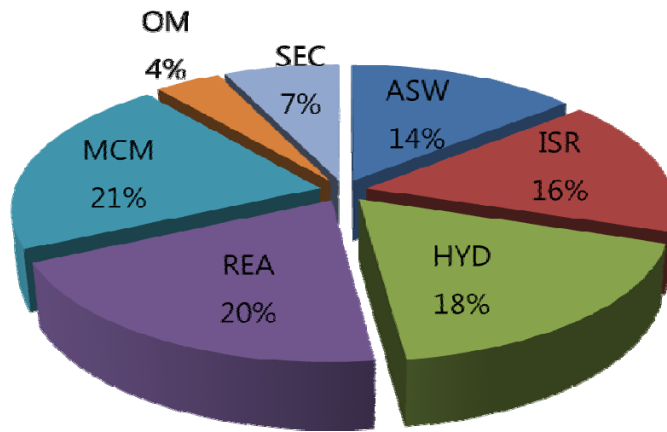


Fig. 1.16 Mission proportion of Military UUVs

기뢰제거는 탐지(Detection), 분류(Classification), 위치확인(Localization), 식별(Identification), 제거(Disposal)의 단계로 이루어진다. 기뢰의 소해는 탐색된 기뢰를 파괴하는 것으로 기뢰에 폭약을 설치하여 파괴하거나 계류선을 절단하여 기뢰를 수면에 부상시켜 소총이나 기관포로 폭파시킨다. 감응기뢰는 목표물에 자기 혹은 음향 감응신호를 발사하여 폭발하는 방법을 사용한다. 통상 자기 음향 복합소해장치를 소해정 혹은 소해헬기와 같은 플랫폼 후미에 예인하는 방식이 주로 사용되기 때문에 기뢰 폭발로 인한 소해플랫폼 및 인명 피해가 우려되는 매우 위험한 작업이기 때문에 기뢰처리를 위한 다양한 무인잠수정들이 개발되어 있다.

기뢰대항전을 위한 무인잠수정은 기뢰 탐색용 무인잠수정과 기뢰 소해용 무인잠수정으로 구분된다. 기뢰 소해용 무인잠수정은 무인기뢰제거정이라고 하며, 소모성 무인기뢰제거정과 회수용 무인기뢰제거정으로 구분된다. 대표적인 소모성 무인기뢰제거정을 Table. 1.1에 나타냈다. Table. 1.1에 있는 소모성 무인기뢰제거정을 모함 또는 헬기에서 진수시켜 목표물 근처에서 플랫폼에 내장된 폭약을 터트려 자폭하여 단시간 내에 소해 할 수 있다. 이 잠수정들은 함정 또는 항공기의 소나에 의한 유도과 자체 보유한 센서를 이용하여 목표까지 접근하게 되며, 연결된 광케이블에 의해 실시간으로 전달되는 영상 및 잠수정의 정보를 이용하여 수동으로 제어할 수 있는 기능을 가지고 있다. Archerfish, Seafox와

같은 자체추진이 가능한 소모성 기뢰제거정이 2010년 현재 약 2,000기 이상 생산되어 각국의 해군에서 사용되고 있다(이충희, 2010). 원격제어의 ROV형 기뢰제거정은 모함과의 연결선에 의한 운용거리와 기동에 제약을 주기 때문에 최근에는 자율제어형의 AUV형으로 전환되고 있는 추세이다.



Table 1.1 Features of Expendable Unmanned Mine Disposal Vehicles

모델/제작기관(국가)	제원 및 특징
Archerfish/BAE Systems(영국) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 제원 : 1.05m(L), 0.14m(D), 39kg ■ 단발 소모성 UUV ■ 해저/부유 기뢰 제거 ■ 수상함 혹은 다른 AUV(Talisman)에서 진수 ■ 미 해군의 공중기뢰소해 시스템(AMNS) ■ MH-60 헬기에서 진수
K-Ster/ECA(프랑스) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 제원 : 1.45m(L), 0.23m(D), 50kg ■ 속도 5kts, 호버링 가능, ■ 센서: Camera, SSS ■ 수상함 진수 FO 케이블에 의해 제어, 1,000m ■ 모든 종류의 기뢰를 상당히 효율적으로 소해
Minesniper/Kongsberg(노르웨이) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 제원 : 1.5m(L), 0.2m(D), 39kg ■ 저가, 확장 가능한 기뢰제거정 ■ 심해, 천해계류, 해저기뢰를 효과적으로 소해 ■ SBL, 음향위치추정 시스템, 항법 컴퓨터, ■ MCM 소나로 목표물 자동 안내 ■ 카메라 영상, 모델기반 항법 시스템
SeaFox/Atlas Elektronik(독일) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 제원 : 1.3m(L), 0.4m(D), 40kg 기뢰제거정 ■ 확장형(SeaFox C), 공중진수/검사형(SeaFox D) ■ 확장형: 단거리 소나와 비디오카메라로 목표물 ■ 준-자율 식별 ■ 미 해군 MH53 MCM 헬기 공중진수형 사용
TransPhibian/iRobot(미국) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 제원 : 0.78m(L), 0.2m(H), 18kg ■ 해안(Surf zone)에서의 MCM 임무 수행 ■ 해양생물모방 4개의 진동 핀 사용 ■ 소형 보트에서 손으로 진수 가능 ■ 수산화-니켈 배터리

1.2 연구목표

일반적인 시뮬레이션은 수학적모델을 이용하여 시스템을 모델링하고 주어진 입력에 대한 시스템의 성능을 확인하는 방법으로 사용된다. 이 방법을 통해서 주어진 시스템과 파라미터들의 시간에 따른 성능을 확인하는데 사용되고, 이를 위해 무인잠수정의 수학적모델을 개발하고, 주어진 제어입력과, 경로를 추종 하기 위한 제어기를 설계하여 운동성능을 해석하게 된다. 대부분의 시뮬레이션에서는 주어진 입력에 대한 응답을 확인하여 시스템의 성능을 확인하며, 이 때 무인잠수정은 주어진 경로를 이동하기 위해 가지고 있는 추진기와 방향타, 승강타 등을 최대한 이용하게 된다. 이러한 방법을 이용하게 되면, 무인잠수정의 특성 상 에너지효율 측면에서 문제가 발생할 수도 있다. 제한된 에너지를 사용하는 무인잠수정의 경우에는 에너지를 효율적으로 사용하지 못하고 이동에 불필요한 에너지를 사용하는 경우가 발생할 수 있다. 이를 극복하기 위해 다양한 에너지 최적화 연구들이 진행되고 있으며, 역동역학을 이용한 방법도 이러한 기법 중 하나이다. 역동역학 기법은 오래전부터 로봇팔의 움직임 최적화 분야(김지훈 등, 2013), 이족보행로봇의 보행분석 분야에서 적용되어 연구되고 있다(박인규 and 김진걸, 2000). 현재에는 의공학 분야와 운동역학 에도 많이 사용되고 있다(명성식, 2011; 김선필 and 이민형, 2000).

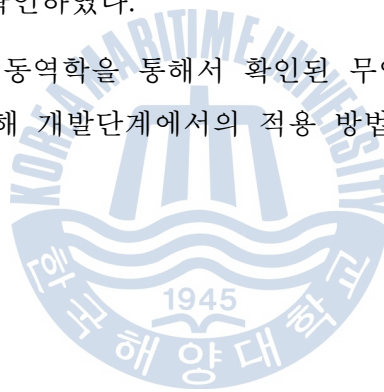
따라서 본 연구에서는 운용개념이 정립된 기뢰제거용 무인잠수정을 설계하는데 있어서 개발 초기 단계에 사용될 수 있는 방법 중 하나인 역동역학 시뮬레이션 기법을 적용하여, 임무수행에 필요한 특정 경로 운항에 필요한 추진기와 시간에 따라 정의된 상태조건을 충족하는 제어입력에 필요한 인자들을 찾아내 시스템에 최적화된 설계를 진행하는데 도움을 주고자 한다. 그리고 이 방법을 이용하여, 운용환경에서의 무인잠수정의 운용에 필요한 최적의 경로를 선택하고 이 때 무인잠수정의 운항에 필요한 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 무인잠수정의 운동성능 해석과 운동에 따른 요구조건에 대한 분석, 제어기의 조종입력 등을 예측 할 수 있게 된다.

1.3 논문구성

본 논문에서는 무인잠수정의 6자유도 운동방정식을 이용하여 시뮬레이션을 위한 운동모델을 설계하고, 제어기 설계를 통해 기 설계된 무인잠수정의 운동 성능을 확인하고, 역동역학 기법을 이용하여 무인잠수정의 특정경로를 이동하는데 필요한 운항을 하기 위해서 필요한 추진기 및 질량이동장치에 필요한 힘과 모멘트를 구하여 이를 정동역학에 적용하였으며, 제어기 설계를 통해 그 성능을 확인하였다.

2장에서는 무인잠수정의 모델링을 위한 6자유도의 운동방정식을 설계하였으며, 기본 운동성능을 확인하였다. 3장에서는 역동역학 기법을 이용하여 특정 경로를 운행하는 무인잠수정에 입력되는 추진기와 질량이동장치의 움직임을 통해 무인잠수정의 운동 성능을 확인하였다. 4장에서는 설계된 무인잠수정의 운동방정식을 이용하여 제어기를 설계하여 수심, 방향에 대한 제어입력에 대한 시스템의 운동성능을 확인하였고, 운용목적에 맞는 3차원의 경로를 생성하여 이동하는 무인잠수정의 운동성능을 확인하였다.

마지막으로 5장 결론에서는 역동역학을 통해서 확인된 무인잠수정의 운동성능 평가 방법에 대한 고찰을 통해 개발단계에서의 적용 방법과 추후 연구과제에 대해 기술하였다.



제 2 장 무인잠수정의 수학 모델

2.1 무인잠수정 모델링

무인잠수정의 성능을 예측하기 위한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 운동 모델을 이용한 시뮬레이션이 필요하다. 무인잠수정의 운동에 관한 수학적 모델은 6자유도의 운동방정식으로 표현되며, 상당수의 유체동역학계수에 의한 힘과 모멘트로 구성된다. 운동방정식은 운항특성이나 형상, 부가물의 종류와 수에 따라 다르게 표현될 수 있으며, 유체역학계수를 찾는 방법에 따라서도 무시되는 항이 달라질 수 있다. 또한 방정식에 포함되는 유체동역학계수들은 실험, 시뮬레이션, 경험식에 의한 추정을 통해 얻을 수 있으며 형상에 따라 다르게 나타난다. 이러한 무인잠수정의 수학모델에 대한 연구들은 오래전부터 진행이 되어왔으며, Gertler와 Hagen은 잠수함의 운동 해석에 있어서 표준이 되는 운동방정식을 정리하였고(1967), Abkowitz 와 Feldman은 실제와 더욱 근사한 수정된 운동방정식을 제시하였다(Abkowitz, 1969; Feldman, 1979). Fossen은 잠수정의 비선형 제어시스템 설계를 위한 모델식을 전개하였고(Fossen, 1994), Healley와 Lienard는 NPS AUV II의 6자유도 비선형 운동방정식과 유체동역학계수를 제시하였다(Healey and Lienard, 1993).

본 논문에서는 Minesniper의 운동방정식을 기반으로 수학모델을 전개하였고(Refsnes, 2007), 유체동역학계수와 추가적으로 전산유체역학을 이용하여 추정된 유체동역학 계수를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 설계된 6자유도 운동방정식과 무인잠수정의 파라미터, 유체동역학계수를 이용한 시뮬레이션을 통해 무인잠수정의 운동성능을 확인하였다.

2.2 무인잠수정의 수학적모델

무인잠수정의 수학적모델은 Minesniper의 모델을 기반으로 구성하여 사용하였다(Refsnes, 2007). 무인잠수정의 6자유도 운동방정식의 표기는 Fossen(1994)의 표기법을 기반으로 구성하였고, 유체력계수에 대한 표기는 Newman(1977), SNAME(1950)의 표기법을 따른다.

2.2.1 좌표계(Coordinate System)

무인잠수정은 3차원 공간인 수중에서 6자유도를 갖는 운동을 수행하기 때문에 기준 좌표계인 지구고정좌표계와 선체고정좌표계 2개의 좌표계를 도입하는 것이 이런 운동을 표현하기에 편리하다. 좌표계는 설계된 무인잠수정을 강체라 가정하고 Fig. 2.1과 같이 잠수정의 부력중심에 선체고정좌표계(Body-fixed coordinate system)을 설정하고, 다른 하나는 지표에 고정되어 있는 지구고정좌표계(Earth-fixed coordinate system)이다. 선체고정좌표계의 중심과 선체의 부력중심을 일치시킨 이유는 부력의 중심이 잠수정의 대칭면(Principal plane of symmetry)에 위치하기 때문에 모델링을 더 단순화 시킬 수 있다. 설정된 좌표계는 선수방향을 x축, 우현방향을 y축 그리고 연직하방을 z축으로 하는 오른손 좌표계를 사용하였다. 또한 설정된 좌표계의 각 축에 대한 병진운동과 회전운동을 6자유도 방정식을 표현할 수 있고 전개된 식에 사용된 좌표축과 명칭은 Table 2.1와 같다.

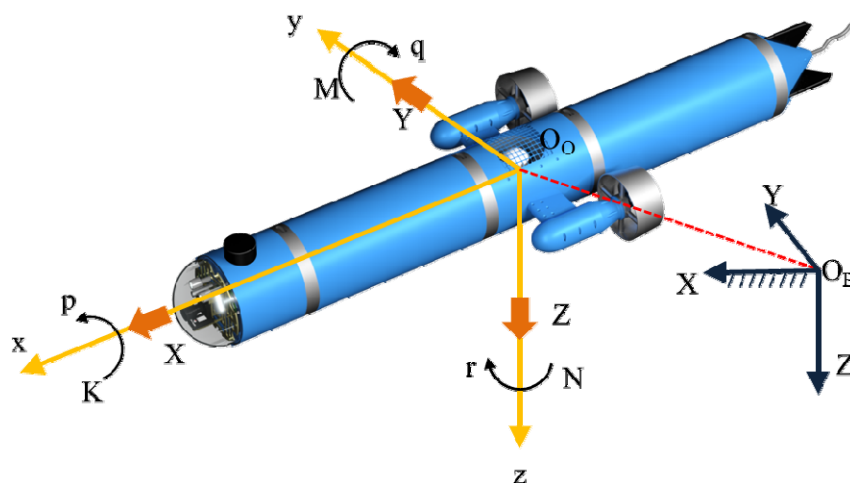


Fig. 2.1 Body-fixed and Earth-fixed reference frame for UUV

Table 2.1 The notation of SNAME for marine vessels

DOF		Forces & Moments	Linear & Angular Velocity	Positions & Euler Angles
1	Surge	X	u	x
2	Sway	Y	v	y
3	Heave	Z	w	z
4	Roll	K	p	ϕ
5	Pitch	M	q	θ
6	Yaw	N	r	ψ

2.2.2 강체동역학(Rigid Body Dynamics)

선체고정좌표계에서의 운동은 지구고정좌표계로 변환하여 표현할 수 있다. 6 자유도 운동방정식에서 위치와 속도 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\eta_1 &= [x, y, z]^T ; & \eta_2 &= [\phi, \theta, \psi]^T \\ \nu_1 &= [u, v, w]^T ; & \nu_2 &= [p, q, r]^T \\ \tau_1 &= [X, Y, Z]^T ; & \tau_2 &= [K, M, N]^T\end{aligned}$$

여기서 η_1, η_2 는 지구고정좌표계에 대한 위치와 자세를 나타내고, ν_1, ν_2 는 선체고정좌표계에 대한 선속도(Linear velocity)와 각속도(Angular velocity)이다. τ_1, τ_2 는 선체고정좌표계에 대한 힘과 모멘트를 나타낸다. 지구고정좌표계에 대한 선체고정좌표계의 자세는 오일러 각(Euler angle)으로 표시한다. 오일러 각은 지구고정좌표계를 각 축에 대하여 3번 회전시켜 선체고정좌표계에 일치시킬 때 얻어지는 각으로 회전은 ψ (yaw angle), θ (pitch angle), ϕ (roll angle)의 순서로 정한다.

선체고정좌표계의 선속도를 지구고정좌표계로 표현하기 위한 변환행렬은 다음의 식(2-1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

여기서 변환행렬 $J_1(\eta_2)$ 는 다음 식(2-2)와 같다.

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\theta\cos\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\theta\sin\phi\sin\psi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\theta\sin\psi\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

다음으로 선체고정좌표계의 각속도를 지구고정좌표계로 표현하기 위한 변환행렬은 다음의 식(2-3)으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2(\eta_2) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

여기서 변환행렬 $J_2(\eta_2)$ 는 다음 식 (2-4)와 같다.

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix}, \theta \neq \frac{\pi}{2} \quad (2-4)$$

여기서 주의할 점은 $\theta = \pm 90^\circ$ 에서는 $J_2(\eta_2)$ 가 정의되지 않는 특이점이라는 것이다. 하지만 잠수정의 피치(θ)가 $\pm 90^\circ$ 가 되는 경우는 거의 일어나지 않으므로 사용하여도 무방하다. 만약에 이러한 경우에 잠수정의 운동을 표현하기 위해서는 쿼터니언 방법을 이용하여 표현하고 있다(Fossen, 1994).



2.2.3 동역학(Kinetics)

무인잠수정의 운동은 강체와 유체에 작용하는 힘과 모멘트로 구분할 수 있다.

2.2.3.1 강체에 작용하는 힘(Rigid Body Forces and Moments)

강체에 작용하는 힘과 모멘트는 다음의 식으로 표현된다.

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = \tau_H \quad (2-5)$$

여기서 M_{RB} 는 강체의 질량 관성 행렬, C_{RB} 는 강체의 코리올리 행렬 이고, τ_H 는 외부 환경요소와 추진력에 관련된 힘과 모멘트가 포함되어 강체에 작용하는 전체 유체역학적 힘과 모멘트를 나타낸다.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & 0 & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_x & 0 & -I_{zx} \\ mz_G & 0 & -mx_G & 0 & I_y & 0 \\ 0 & mx_G & 0 & -I_{zx} & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

여기서 m 은 잠수정의 총 중량을 의미하고, I_x, I_y, I_z, I_{zx} 는 관성모멘트, $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ 는 잠수정의 중력 중심의 좌표를 나타낸다. $y_G=0$ 인 경우는 좌우 대칭의 형상을 갖는다.

강체의 코리올리 행렬은 다음 식(2-7)과 같으며, 그 구성 요소는 식(2-8)~식(2-10)과 같다.

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} m(z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -mw & m(z_G r + x_G p) & \mu \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & mx_G p \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

$$C_{21} = \begin{bmatrix} -mz_G r & mw & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & -mu & -mx_G p \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -I_{zx} p + I_z r & I_y q \\ I_{zx} p - I_z r & 0 & -I_{zx} r + I_x p \\ I_y q & I_{zx} r - I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$C_{RB}(\nu)$ 는 강체의 Coriolis-centripetal 행렬이고, 이 행렬은 왜대칭 (skew-symmetry¹⁾) 행렬이다.



¹⁾ skew-symmetry matrix ($A = -A^T$)

2.2.3.2 유체력(Hydrodynamic Forces and Moments)

무인잠수정이 수중에서 운동할 때 외부로부터 받는 힘과 모멘트는 크게 5가지로 나누어진다.

- (1) Added mass에 의한 힘과 모멘트
- (2) Drag에 의한 힘과 모멘트
- (3) 부력과 중력 차이에 의한 힘과 모멘트
- (4) 추진기(추진력)에 의한 힘과 모멘트
- (5) 제어판에 의한 힘과 모멘트

선체에 작용하는 유체역학적 힘과 모멘트 벡터는 다음 식(2-11)과 같다.

$$\tau_H = M_A \dot{\nu} + C_A(\nu)\nu - D(\nu)\nu - g(\Theta) + \tau \quad (2-11)$$

M_A 는 수중에서 잠수정의 주위의 유체에 의해 발생하는 부가질량에 대한 행렬이다. 어떤 물체가 유체 내에서 가속을 하게 되면, 그 물체를 둘러싸고 있는 유체도 또한 가속이 되어야 한다. 따라서 물체와 함께 가속시켜줘야 하는 유체가 덧 붙여져 질량이 커진 효과가 나타나는데 이를 부가질량(Added mass)라고 한다. 공기 중이라면 공기의 밀도가 물체의 밀도보다 매우 작기 때문에 무시할 수 있으나 수중에서는 반드시 고려되어야 한다. 행렬 M_A 는 식(2-12)와 같다. 식(2-12)는 선체가 x-y 평면과 x-z 평면에 대해 서로 대칭인 선체에 대한 부가질량행렬이다. 여기서 X_u , Y_v 등의 계수는 부가질량계수(A.1)이다.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

부가질량에 의한 힘은 위 식을 Kirchhoff 방정식에 대입하면 Added mass에 의한 힘과 모멘트는 다음과 같다(Kirchhoff, 1869).

$$\begin{aligned}
X_A &= X_u \dot{u} + Z_w w \dot{q} + Z_q \dot{q}^2 - Y_v v \dot{r} - Y_r r^2 \\
Y_A &= Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + X_u u \dot{r} - Z_w w \dot{p} - Z_q p \dot{q} \\
Z_A &= Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} - X_u u \dot{q} + Y_v v \dot{p} + Y_r r \dot{p}
\end{aligned} \tag{2-13}$$

$$\begin{aligned}
K_A &= K_p \dot{p} - (Y_v - Z_q) v w - (Y_r + Z_q) w r + (Y_r + Z_q) v q - (M_q - N_r) q r \\
M_A &= Z_q (\dot{w} - u \dot{q}) + M_q \dot{q} - (Z_w - X_u) w u - Y_r v p + (K_p - N_r) r p \\
N_A &= Y_r \dot{v} + N_r \dot{r} - (X_u - Y_v) u v + Y_r u r + Z_q w p - (K_p - M_q) p q
\end{aligned} \tag{2-14}$$

C_A 는 유체력에 의한 Coriolis 행렬로 식 (2-15)와 같다.

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -(Z_w w + Z_q q) & Y_v v + Y_r r \\ 0 & 0 & 0 & Z_w w + Z_q q & 0 & -X_u u \\ 0 & 0 & 0 & -(Y_v v + Y_r r) & X_u u & 0 \\ 0 & -(Z_w w + Z_q q) & Y_v v + Y_r r & 0 & -(N_v v + N_r r) & M_w w + M_q q \\ Z_w w + Z_q q & 0 & -X_u u & N_v v + N_r r & 0 & -K_p p \\ -(Y_v v + Y_r r) & X_u u & 0 & -(M_w w + M_q q) & K_p p & 0 \end{bmatrix} \tag{2-15}$$

행렬 $D(\nu)$ 는 유체에서 일정한 속도로 이동하는 잠수정에 작용하는 감쇠력을 나타내는 행렬이며, 식 (2-16)과 같이 구성된다. 잠수정이 유체 내에서 운동하게 되면 속도와 속도의 제곱에 비례하는 저항력을 받게 된다. 이 저항에 의한 감쇠력은 식(2-16)과 같이 선형감쇠력(D_l), 직진운동 시 증가하는 감쇠력(D_u) 그리고 비선형감쇠력($D_{nl}(\nu)$)의 합으로 구성되며, 각각의 감쇠력은 다음의 식 (2-17) ~ 식(2-19)와 같다. 식(2-17)에서 X_u , Y_v 등 각 항은 선형감쇠계수라고 한다.

$$D(\nu)\nu = D_l \nu + u D_u \nu + D_{nl}(\nu)\nu \tag{2-16}$$

$$D_l = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & -Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & -N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \tag{2-17}$$

감쇠력은 잠수정이 직진운동을 하면서 발생하는 힘으로 식 (2-18)과 같다.

$$D_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{uv} & 0 & 0 & 0 & -Y_{ur} \\ 0 & 0 & Z_{uw} & 0 & Z_{uq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{up} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{uw} & 0 & M_{uq} & 0 \\ 0 & -N_{uv} & 0 & 0 & 0 & N_{ur} \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

$$D_{nl}(\nu) = \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & -Y_{|v|r}|v| \\ 0 & 0 & Z_{|w|w}|w| & 0 & Y_{|w|q}|w| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{|p|p}|w| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{|q|w}|q| & 0 & M_{|q|q}|q| & 0 \\ 0 & -N_{|r|v}|v| & 0 & 0 & 0 & N_{|r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

위 식에서 보듯 무인잠수정의 저항에 대한 감쇠력은 세 가지 항이 연성되어 있으며, 전진 방향 속도 u 가 0이 되는 경우에는 다른 감쇠력은 상쇄되며, 비선형 항만 존재하게 된다.

부력과 중력의 차이로 생기는 힘과 모멘트는 중량 $W=mg$ 이고, 부력 $B=\rho g \nabla$ 인 경우, 이 값을 선체고정좌표계 상에서 나타내면 다음과 같다.

$$F_G = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix}, \quad F_B = J_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix}$$

이 때, m 은 선체의 질량, g 는 중력가속도, ∇ 는 선체가 유체 속에서 차지하는 부피, ρ 는 유체의 밀도이다. 그러므로 부력과 중력 차이 때문에 생기는 힘과 모멘트는 각각 다음과 같으며, r_G 는 부력 중심에서 무게 중심까지의 거리 벡터이다.

$$F_H = F_G - F_B$$

$$M_H = r_G \times F_G - r_G \times F_B$$

이를 풀어서 계산하면, 다음의 식(2-20)과 같다.

$$X_H = -(W - B)\sin\theta \quad (2-20)$$

$$Y_H = (W - B)\cos\theta \sin\phi$$

$$Z_H = (W - B)\cos\theta \cos\phi$$

$$K_H = (y_G W - y_B B)\cos\theta \cos\phi - (z_G W - z_B B)\cos\theta \sin\phi$$

$$M_H = -(z_G W - z_B B)\sin\theta - (x_G W - x_B B)\cos\theta \cos\phi$$

$$N_H = (x_G W - x_B B)\cos\theta \sin\phi + (y_G W - y_B B)\sin\theta$$

만약 $W = B$ 이고, 무게중심 (x_G, y_G, z_G) 과 부력중심 (x_B, y_B, z_B) 의 위치가 같은 경우는 식 (2-21)과 같이 단순화할 수 있다.

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ (Z_G W - Z_B B)\cos\theta \sin\phi \\ (z_G W - z_B B)\sin\theta + (x_G W - x_B B)\cos\theta \cos\phi \\ -(x_G W - x_B B)\cos\theta \sin\phi \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

2.2.3.3 질량이동장치 모델링(Moving Mass System Modeling)

본 논문의 대상 무인잠수정은 수심제어를 위한 승강타가 없으며, 수직추진기의 용량이 좌·우의 수평추진기에 비해 상대적으로 작은 용량을 가지고 있기 때문에 심도제어를 위해서 피치각을 변화시키기 위한 질량이동장치(Mass Moving System)를 포함하고 있다. 이 방법은 수중글라이더의 운용에 많이 사용되고 있으며, 다음의 Fig. 2.2은 질량물이 선체의 직진방향으로 움직이면서 피치각을 변화 시키는 구조를 보여주고 있다. 질량물의 이동은 다음의 식(2-22)으로 X방향의 중심을 이동시켜 피치각을 발생시킨다.

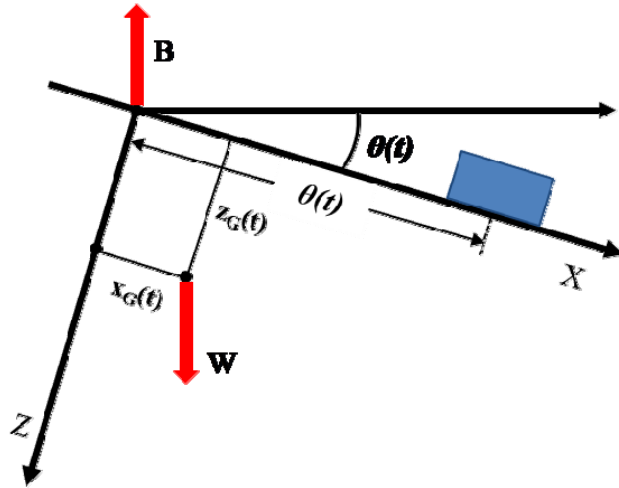


Fig. 2.2 Configuration of mass moving system for pitch control

$$x_G(t) = \frac{m_\theta}{m} d_\theta(t) \quad (2-22)$$

식 (2-22)에서 $d_\theta(t)$ 는 질량 중심에서 질량물까지의 거리, m 은 무인잠수정의 총 중량을 나타내고, m_θ 는 질량물의 무게를 나타낸다. 식(2-21)의 $g(\theta)$ 에서 질량물을 이동시키기 위한 모터의 추력인 τ_q 는 $\tau_q = z_G W \sin \theta$ 로 표현할 수 있으며, 이를 이용하여 질량물의 위치를 구하는 식은 다음의 식(2-23)으로 나타낼 수 있다.

$$d_\theta(\tau_q) = -\frac{m z_G}{m_\theta} \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\tau_q}{z_G W} \right) \right) \quad (2-23)$$

2.2.3.4 추진기 모델링(Thruster Modeling)

무인잠수정의 방향각을 제어하기 위해서 두 개의 수평추진기를 이용한다. 두 개의 수평 추진기는 선체의 중심에 대해서 좌현과 우현에 각각 위치한다. 추진기의 추력은 식(2-29)로 표현한다(Whitcomb and Yoerger, 1999).

$$T(n) = \beta_2 |n| n - \beta_1 u_r |n| \quad (2-29)$$

위 식에서 $\beta_1 = \rho D_h^3 \mu_1 U_a (1 - t_n)$, $\beta_2 = \rho D_h^4 \mu_2 (1 - t_n)$ 이고, ρ 는 물의 밀도, D_h 와 t_n 은 각각 프로펠러의 직경과 추진감쇠계수이다.

위 식을 이용하면 잠수정의 직진방향 추력과 횡방향 모멘트는 다음의 식(2-30)로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ d_p & -d_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T(n_p) \\ T(n_s) \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

위 식에서 n_p 와 n_s 는 각각 잠수정의 우현, 좌현에 장착된 추진기의 프로펠러 회전수이고, d_p 는 잠수정의 중심에서 프로펠러까지의 거리이다.

수직추진기는 다음의 식(2-31)로 표현할 수 있으며, 수직방향 운동과, 피치운동과 관련된다.

$$\tau_q = -(T_S - T_P) d_p \sin(\phi) \quad (2-31)$$

2.2.3.5 운동방정식(Equations of Motion)

위에서 구한 식을 대입하여 전개하면 식(2-32)~식(2-37)와 같이 6자유도 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] = X_{ext} \quad (2-32)$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] = Y_{ext} \quad (2-33)$$

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(pq + \dot{r})] = Z_{ext} \quad (2-34)$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{zx}(pq + \dot{r}) + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] = K_{ext} \quad (2-35)$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr - I_{zx}(r^2 - p^2) + I_{yz}(pq - \dot{r}) - I_{xy}(qr + \dot{p}) + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] = M_{ext} \quad (2-36)$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{zx}(qr - \dot{p}) - I_{yz}(pr + \dot{q}) + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] = N_{ext} \quad (2-37)$$

위 식을 행렬식으로 나타내면 아래의 식(2-38)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 & -mz_G & 0 & mx_G - Y_r \\ 0 & 0 & m - Z_w & 0 & -mx_G - Z_q & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_x - K_p & 0 & -I_{zx} \\ mz_G & 0 & -mx_G - M_w & 0 & I_y - M_q & 0 \\ 0 & mx_G - N_v & 0 & -I_{zx} & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ext} \\ Y_{ext} \\ Z_{ext} \\ K_{ext} \\ M_{ext} \\ N_{ext} \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

위 식에서 우항의 첨자 ext 는 Hydrostatic, Added mass, Drag를 포함하는 외력에 대한 식이며, $X_{ext} \sim N_{ext}$ 는 다음 식(2-39) ~ 식(2-44)와 같다.

$$\begin{aligned}
X_{ext} = & -(m + Y_v)vr + (m - Z_w)wq - (mx_G + Z_q)qq - (mx_G - Y_r) \\
& + X_uu + X_{|u|u}|u|u \\
& + \tau_u
\end{aligned} \tag{2-39}$$

$$\begin{aligned}
Y_{ext} = & (m - X_u)ur + (Z_w - m)wq + (Z_q + mx_G)pq + mz_Gqr \\
& + Y_vv + Y_{uv}uv + Y_{|v|v}|v|v - Y_rr - Y_{ur}ur - Y_{|v|r}|v|r
\end{aligned} \tag{2-40}$$

$$\begin{aligned}
Z_{ext} = & (X_u - m)uq - (Y_v + m)vp - (Y_r - mx_G)pr - mz_G(pp + qq) \\
& + Z_wu + Z_{uw}uw + Z_{|w|w}|w|w + Z_qq + Z_{uq}uq + Z_{|w|q}|w|q
\end{aligned} \tag{2-41}$$

$$\begin{aligned}
K_{ext} = & (Y_v - Z_w)vw + (Y_r + M_w)wr - (Z_q + N_v)vq \\
& + (M_q + N_r + I_z - I_y)qr - I_{zx}pq \\
& + mz_G(pw - ur) \\
& + K_pp + K_{up}up + K_{|p|p}|p|p \\
& + (z_GW - z_BB)\cos\theta\sin\phi
\end{aligned} \tag{2-42}$$

$$\begin{aligned}
M_{ext} = & (Z_q + mx_G)uq - (X_u + Z_w)uw + (N_r - K_p + I_x)pr + N_vvp \\
& + (pp - rr)I_{zx} - (z_Gr - x_Gp)mw + mwz_Gq \\
& + M_wu + M_{uw}uw + M_{|q|w}|p|w + M_qq + M_{uq}uq + M_{|q|q}|q|q \\
& + (z_GW - z_BB)\sin\theta + (x_GW - x_BB)\cos\theta\cos\phi \\
& + \tau_q
\end{aligned} \tag{2-43}$$

$$\begin{aligned}
N_{ext} = & (X_u - Y_v)uv + (K_p - M_q + I_y - I_x)pq - M_wup \\
& + (ur - up)mx_G \\
& - N_vv - N_{uv}uv - N_{|r|v}|r|v + N_rr - N_{ur}ur - N_{|r|r}|r|r \\
& - (x_GW - x_BB)\cos\theta\sin\phi \\
& + \tau_r
\end{aligned} \tag{2-44}$$

2.3 무인잠수정의 계수추정 방법

무인잠수정의 운동모델을 이용한 시뮬레이션을 위해서는 유체력계수들이 필요하다. 이 유체력계수를 측정하는 방법으로는 시험에 의한 방법과 경험식에 의한 방법, 전산유체역학을 이용한 추정이 있다(Barros *et al.*, 2008). 그리고 저항계수와 추진계수 등의 계수를 얻기 위해서는 저항시험, 추력시험(POW: Propeller Open Water), 자유항주시험 등이 필요하다. 무인잠수정의 유체력계수는 크게 정유체력계수(Static hydrodynamic coefficients)와 동유체력계수(Dynamic hydrodynamic coefficients)로 나눌 수 있다. 이 중에서 동유체력계수는 운항과 관련되는 선형감쇠계수(Linear damping coefficients), 부가질량 및 관성과 관련되는 선형관성계수(Linear inertial force coefficients), 비선형감쇠계수(Nonlinear damping coefficients)로 구분된다.

2.3.1 경험식에 의한 방법

경험식에 의한 방법은 3차원의 선체를 세장체(Slender body)로 보아 근사적으로 동일한 2차원 단면(Strip)을 갖는다고 가정하고, 각 단면의 유체력 계수들을 구한 후 이를 길이방향으로 합하여 전체의 유체력을 구하는 근사적 방법인 Strip method를 사용하고 있다(이승건, 2011). 그리고 Slice hull에 대해 경험식을 이용하여 유체력계수를 구하는 연구도 진행되었었다(Wolkerstorfer, 1995).

2.3.2 시험에 의한 방법

유체력을 측정하는 시험을 구속모형시험이라고 하는데, 이 방법은 유체력을 가장 정확히 추정할 수 있는 방법 중 하나이다. 구속모형시험은 타각, 프로펠러 회전, 선박의 전진방향, 횡방향, 선회방향에 대한 운동을 가하고 이 때 선박에 걸리는 힘을 분력계(Load cell)를 이용하여 측정하는 시험이다. 구속모형시험장치는 Fig. 2.3과 같은 PMM(Planar Motion Mechanism)과 Fig 2.4와 같은 회전팔(RA: Rotating Arm)시험장치가 있다. PMM 시험장치는 모형선에 횡방향과 선수 회전방향으로 Fig. 2.5와 같은 조화운동(Sinusoidal Motion)을 주면서 모형선에 걸리는 힘을 측정하는 장비이고, 회전팔 시험장치는 수조 가운데 축을 중심

으로 일정한 각속도로 회전하는 팔에 모형선을 매달고 힘을 계측할 수 있는 시험 장치이다(신지환 등, 2011). 시험에 의한 유체력계수 추정 방법은 실제와 가장 유사한 값을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 모형시험에 시간과 경비가 많이 들기 때문에 선형을 조금씩 바꾸어가며 평가해야 하는 초기설계단계에서는 사용에 어려움이 있다.



Fig. 2.3 Planar Motion mechanism

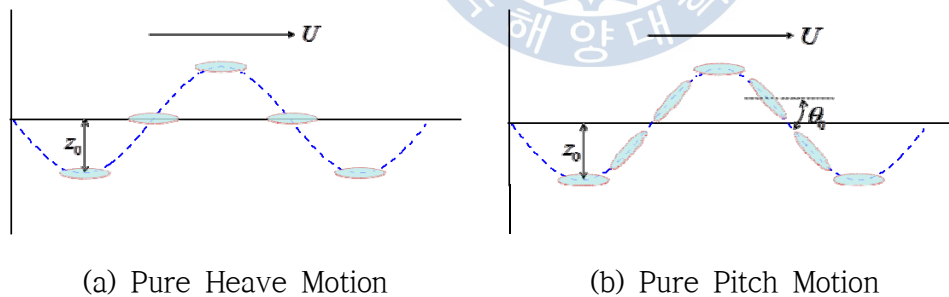


Fig. 2.4 PMM test motions



Fig. 2.5 Rotating-Arm mechanism

2.3.3 전산유체역학을 이용한 방법

앞선 두 가지의 방법을 이용한 무인잠수정의 유체력을 측정하고, 유체력 계수를 측정, 추정 하는 방법의 단점을 어느 정도 보완할 수 있는 방법으로 전산 유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 이용한 방법이 많이 사용되고 있다(Joung, 2014). CFD를 이용한 방법은 개발 초기단계부터 사용이 가능하고, 효과적으로 계수를 추정할 수 있는 방법이다. CFD 해석은 신뢰도를 높이기 위해 기존의 경험식과 비교 및 해석결과의 분석을 통해 설계에 필요한 값들을 찾아낸다. CFD를 이용한 방법은 초기에는 단순히 저항값을 추정하는 방법을 이용하였으나, 최근에는 수조시험을 모사할 수 있는 방법을 이용하여, PMM 시험과 회전팔 시험을 모사하여 유체력계수와 저항계수 등을 찾아내고 있다. CFD를 이용한 계수추정 방법은 다음 장에서 좀 더 자세히 설명한다.

2.4 CFD를 이용한 무인잠수정의 계수 추정

CFD는 유체의 물리적 움직임을 수학적식으로 표현한 편미분방정식 또는 적분 방정식들을 컴퓨터를 이용하여 수치적 방법으로 풀어 해를 얻는 방법이다. 모든 물리적 현상을 해석하는 데는 관찰 또는 현상을 재현하는 실험적 방법과 수학적 언어를 사용하여 그 현상을 표현하는 방정식을 만들어 해석하는 방법과 사람의 수작업 등으로 간단히 구해지지 않는 복잡한 유동현상에 대한 유체운동 방정식을 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션 하는 방법으로 나눌 수 있다. CFD는 이 방법 중 모형제작, 측정기술의 어려움과 함께 비용과 시간에 의해 제약을 받는 실험적 방법과 고전적인 수학적 유체 운동 방정식 해석법으로 풀기 어려운 실제적 문제들을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 해를 구하는 방법이다. CFD는 실제로 우리가 알고 싶은 선박, 자동차, 항공기 주위와 내부 그리고 다양한 기계, 화학공업장치, 전자기기 내부에 대한 복잡한 유동현상에 대한 시뮬레이션이 가능하기 때문에 시간을 절감할 수 있는 경제적인 방법이고 시뮬레이션 과정에서 대부분의 유체 운동정보를 모두 얻을 수 있어서 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

무인잠수정의 형상을 설계하는데 있어서 중요한 것 중의 하나는 저항을 최소화 할 수 있는 형상을 도출하는 것이다. 따라서 형상설계 단계에서 저항 예측은 필수적이며, 예측결과를 설계에 반영하여 설계를 진행한다. 이를 위해서 상용 전산유체역학 프로그램인 STAR-CCM+를 사용하였다. 본 논문에서 계산된 유동특성은 무인잠수정의 설계와 시뮬레이션에 필요한 자료로 사용된다. 다음의 Fig. 2.6은 CFD 해석에 사용된 무인잠수정의 형상이다. 선체의 좌·우와 중앙부의 추진기 장착에 의한 선형의 변화와 부가물의 장착에 의한 저항 성능의 변화를 고려하기 위해 총 8가지의 Model을 선정하여 저항해석을 수행하였다.

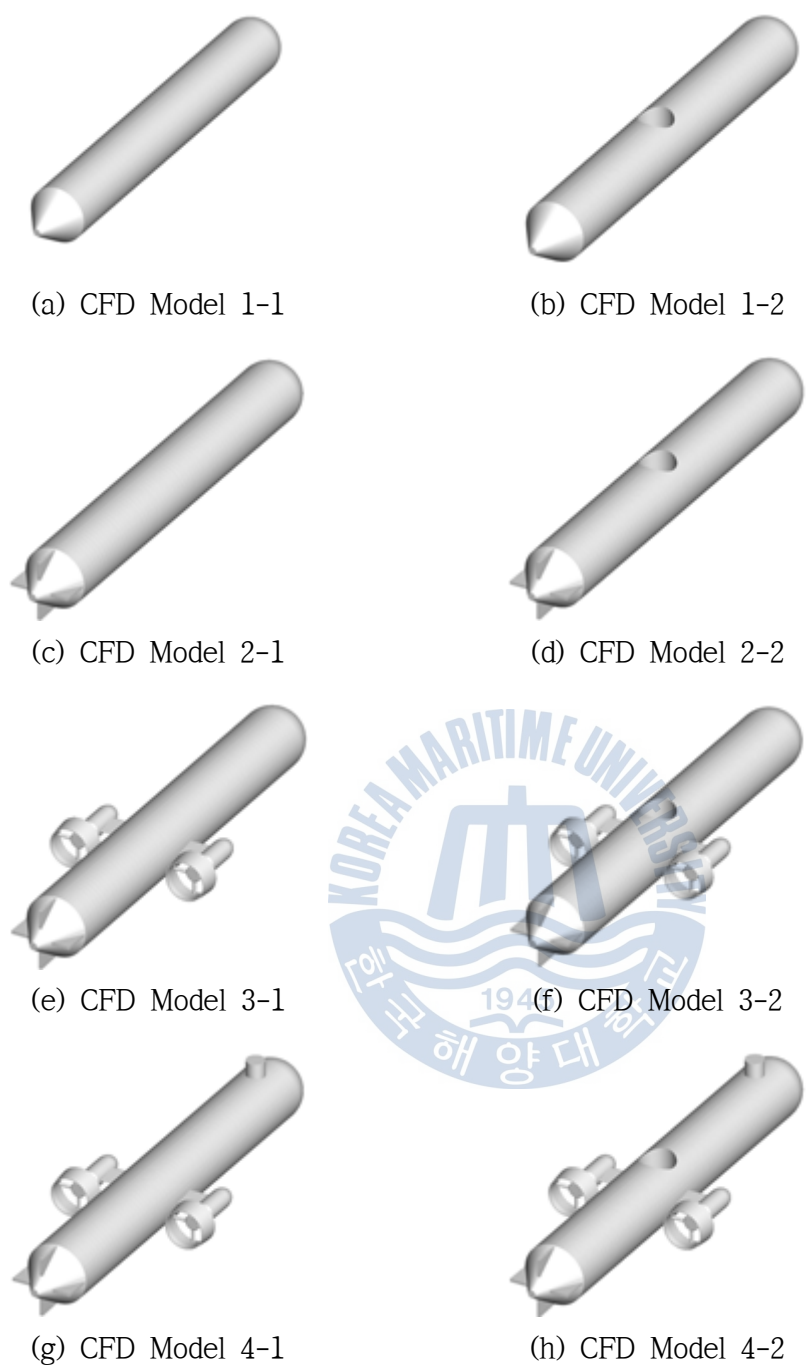


Fig. 2.6 CFD models for the hydrodynamic coefficients calculation

해석영역에 의한 벽면의 간섭 및 선수부에 유입되는 유체흐름의 안정성을 고려하기 위해 해석영역의 크기를 Fig. 2.7과 같이 정의하였다. 여기서 L 은 선체의 길이를 나타낸다. 또한 계산시간의 절약을 위해 선체의 절반만 계산을 수행하였으며, 반대쪽 부분의 유동장을 고려하기 위해 선체 중간 부분에 Symmetry 경계조건을 부여하였다.

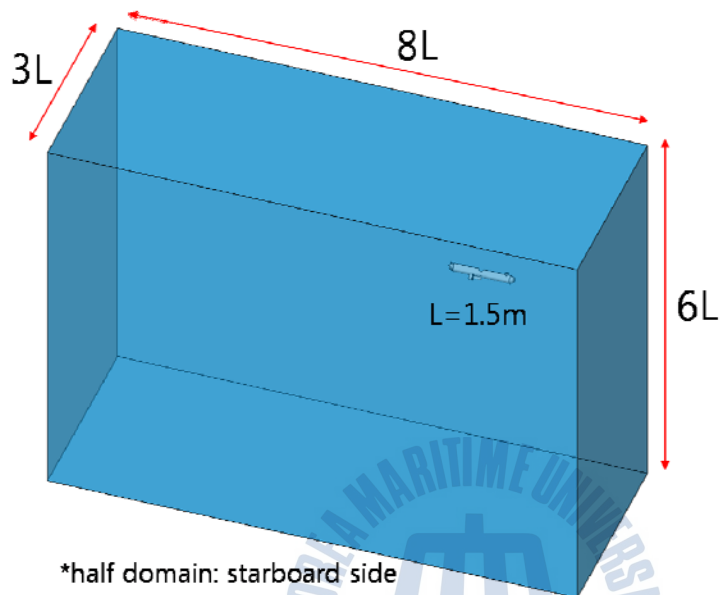


Fig. 2.7 Domain size for CFD calculation

저항 해석을 위해 사용된 수치 기법은 다음과 같다.

- 지배방정식 : 연속방정식, RANS
- 난류모델 : SST $k-\omega$ (Menter)
- 1st. order time integration
- Inner iteration number : 3
- Time step : 0.01s

저항 해석을 위해 사용한 지배방정식은 RANS(Reynolds Average Navier-Stokes equation) 모델로 유체의 운동을 시간 평균된 방정식으로 나타낸 모델이다. 난류모델은 계산시간이 빠르며, 비구조체 사면체 격자에 적합한 SST $k-\omega$ (Shear Stress Transport k - ω) 모델이다. 이 모델은 축대칭인 무인잠수정의 저항 예측에서 시험값을 가장 잘 예측하며, 경계층 영역에서의 효과를 보기 위해 개발된 모델이다. Fig. 2.8은 해석에 사용한 격자구조를 나타내고 있다. 격자의 구성은 해석영역에 따라 선체의 주변에는 조밀한 격자를 형성하여 선체 주변의 유동을 세밀하게 표현할 수 있도록 배치하였고, 선체에서 멀리 떨어진 부분은 격자의 조밀도를 낮게 설정하여 빠른 계산이 가능하도록 하였다. 또한 Trimmer 격자를 사용하면서 선체를 감싼 부분에는 Prism layer를 설정하여 선체 표면에서의 난류를 더욱 효과적으로 표현할 수 있도록 격자를 형성하였다. Fig. 2.9 ~ Fig. 2.11에는 추진기 부분과 선수부, 선미부 주변의 Trimmer 격자 및 Prism layer의 배치를 나타낸다. Fig. 2.12는 부가물의 부착에 따른 격자 구성의 변화를 나타낸다. 그리고 모델의 형상에 따른 격자수의 변화는 Table 2.2에 나타낸다.

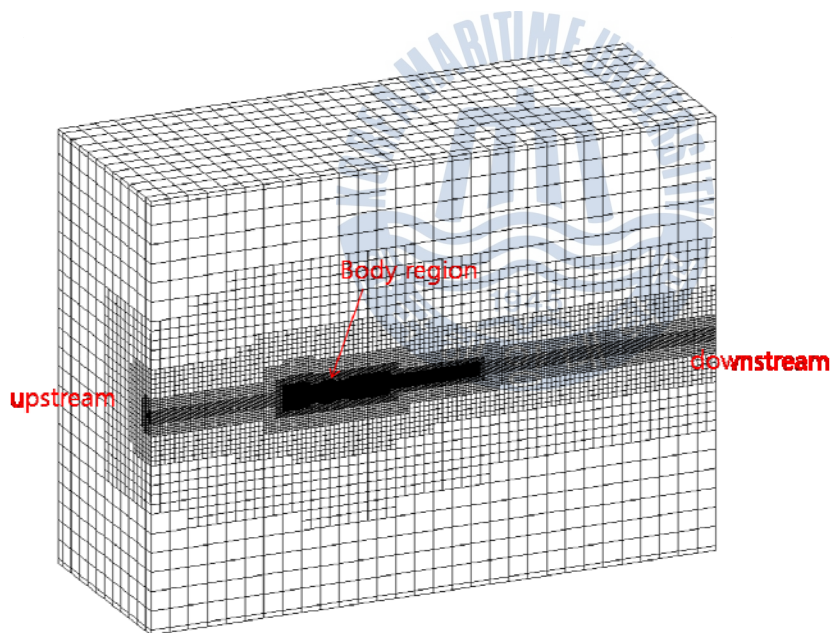


Fig. 2.8 Domain meshes with prism layer for CFD analysis

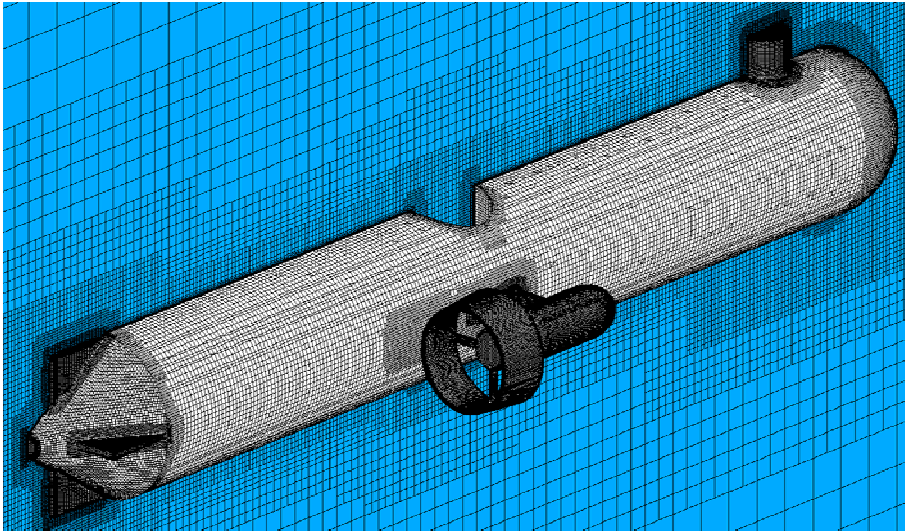


Fig. 2.9 Structured meshes for CFD analysis

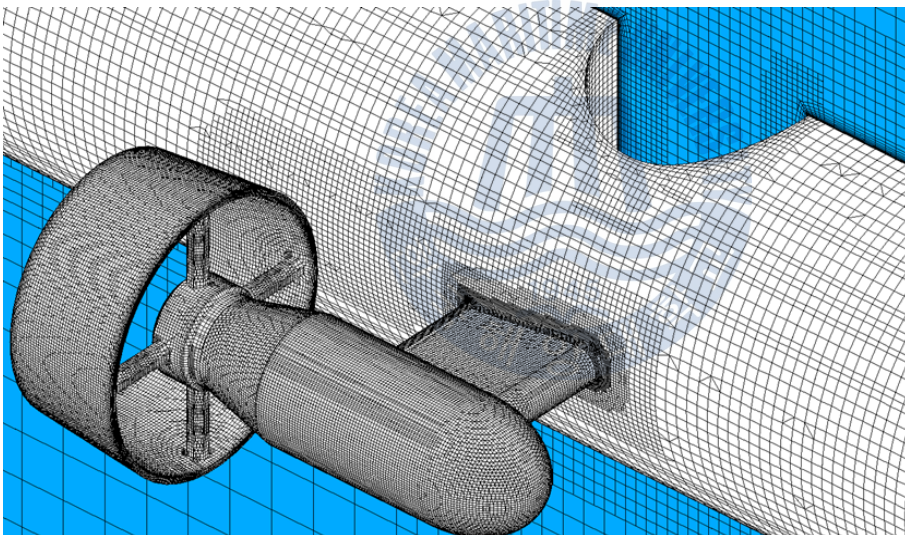
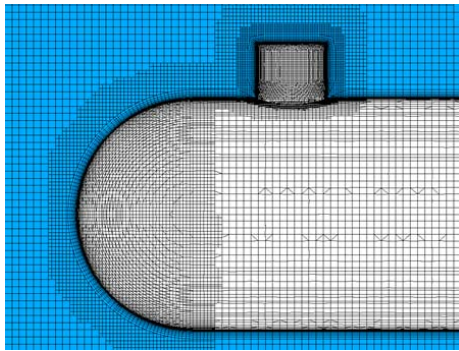
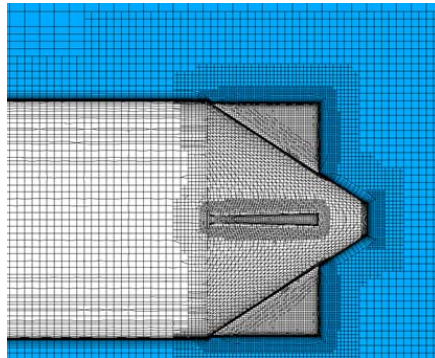


Fig. 2.10 Structured meshes around thruster

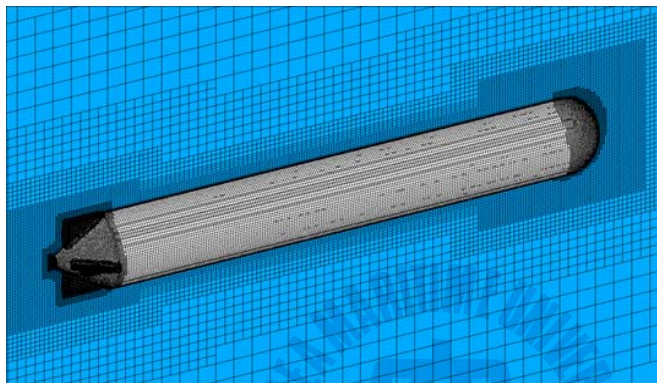


(a) Grid strategy of bow region

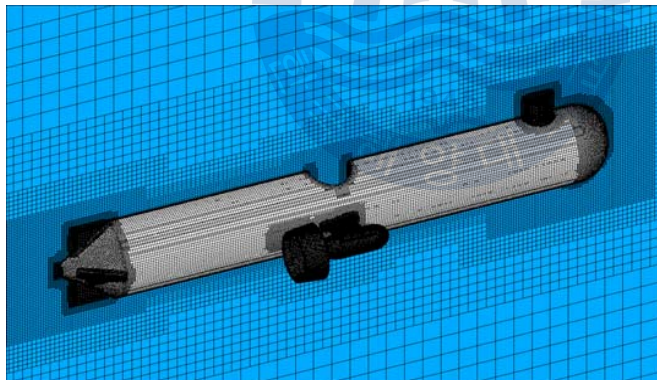


(b) Grid strategy of stern region

Fig. 2.11 Grid strategy of each region



(a) Grid strategy of bow region



(b) Grid strategy of stern region

Fig. 2.12 Differences of grid distribution due to model shape

Table 2.2 Number of grids due to test case

Test case	Number of grids (millions)
CFD Model 1-1	0.74
CFD Model 1-2	0.81
CFD Model 2-1	0.93
CFD Model 2-2	1.00
CFD Model 3-1	2.38
CFD Model 3-2	2.46
CFD Model 4-1	2.47
CFD Model 4-2	2.55

유동장의 유속에 따른 저항 값의 수렴도는 Fig. 2.13에 나타낸다. Fig. 2.13을 살펴보면 3.5 kts로 운항할 때 저항값은 약 3초가 지난 후 안정화되는 추세를 보이고 있으며, 7 kts로 운항할 경우에는 약 4.5초가 지난 후 수렴하는 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이를 통해 계산 결과의 수렴도를 확인할 수 있었으며, 최대 4.5초 이후에 선체 주변의 유동장이 안정화됨을 알 수 있었다.

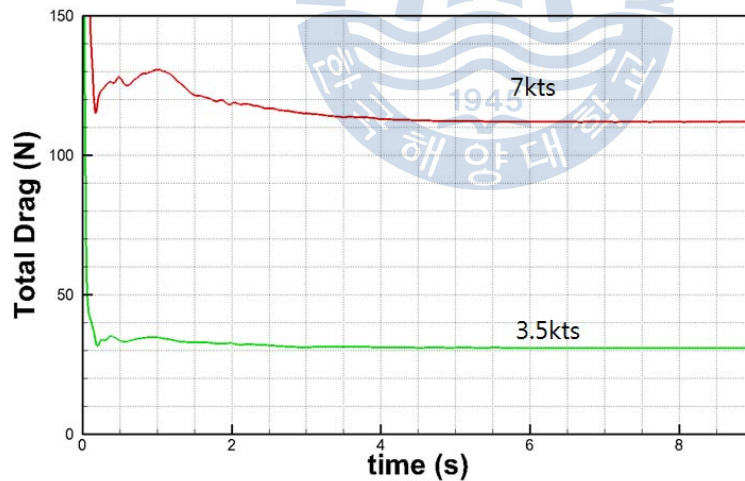


Fig. 2.13 Convergence history of CFD model 4-2

Fig. 2.14, 2.15는 유동장이 안정된 이후의 선체 주변 압력 분포와 X-방향에 대한 유속 분포를 보여주고 있다.

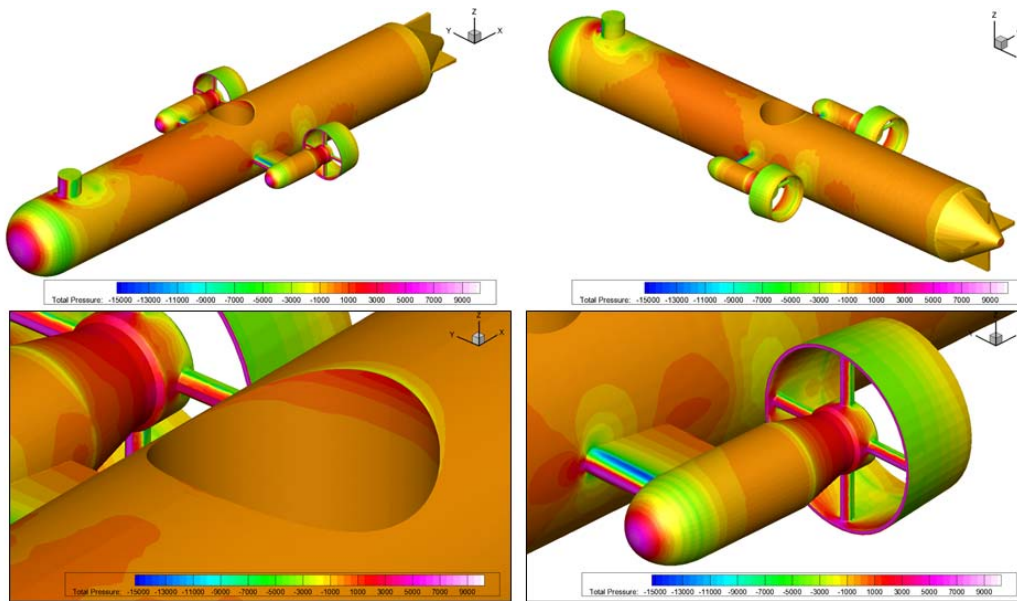


Fig. 2.14 Pressure distribution of CFD Model 4-2

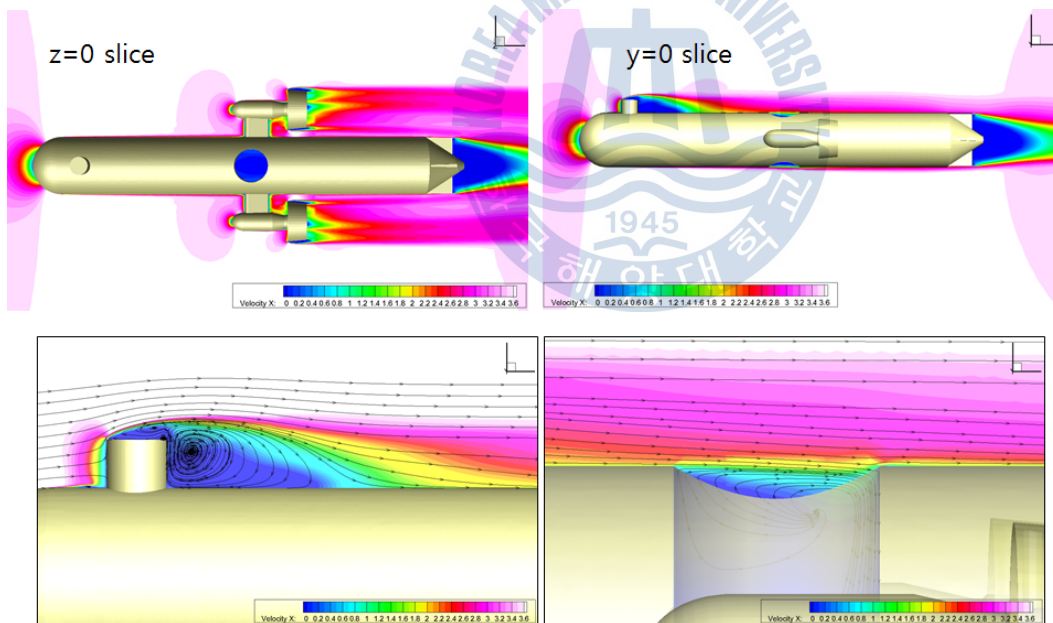


Fig. 2.15 Axial surge velocity distribution of CFD Model 4-2

Fig. 2.14에서 보면 무인잠수정이 주행 시 유체와 접촉이 가장 많은 선수부분과 수평추진기, 선수부 위쪽의 센서 부분에 많은 압력이 발생하는 것을 볼 수 있고, Fig. 2.15에서 유속의 분포를 보면 선체에 부가물이 있는 부분에서 속도 변화가 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 선체에 부가물이 장착되는 경우에는 저항에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

다음 Table 2.3과 Table 2.4는 CFD 시뮬레이션을 통해 구한 형상별 저항을 항주속도인 3.5 kts와 최대속도인 7 kts에 대하여 각각 구한 결과를 정리하였다.

Table 2.3 Total drag calculation on 3.5 kts

Test case	Pressure Drag(N)	Friction Drag(N)	Total Drag(N)	% difference against model 4-2	Surface Area(m ²)
model 1-1	6.734	5.679	12.413	40.2	0.914
model 1-2	7.132	5.505	12.637	40.9	0.958
model 2-1	6.445	5.684	12.129	39.2	0.937
model 2-2	6.845	5.54	12.384	40.1	0.981
model 3-1	21.195	6.926	28.121	91	1.161
model 3-2	21.442	6.68	28.123	91	1.205
model 4-1	24.109	6.775	30.884	99.9	1.171
model 4-2	24.38	6.524	30.904	100	1.215

Table 2.4 Total drag calculation on 7 kts

Test case	Pressure Drag(N)	Friction Drag(N)	Total Drag(N)	% difference against model 4-2	Surface Area(m ²)
model 1-1	26.698	19.031	45.729	40.8	0.914
model 1-2	28.302	18.397	46.699	41.7	0.958
model 2-1	25.609	19.045	44.653	39.9	0.937
model 2-2	27.282	18.518	45.799	40.9	0.981
model 3-1	76.866	23.514	100.38	89.6	1.161
model 3-2	78.69	22.939	101.628	90.7	1.205
model 4-1	87.711	22.976	110.687	98.8	1.171
model 4-2	89.588	22.405	111.993	100	1.215

선체의 저항계수는 선체에 작용하는 저항과 표면마찰저항으로 구성되며, 점성에 의한 마찰저항계수(CF) 추정을 위해 일반적으로 사용되는 ITTC의 식 (2-45)을 사용하여 비교하였다.

$$CF_{ITTC} = \frac{0.072}{(\log Re - 2)^2} \quad (2-45)$$

3.5 kts의 경우 레이놀즈수(Re)는 2.7×10^6 이고, 7 kts의 경우는 5.4×10^6 이다. 아래 Table과 ITTC의 식을 비교하면, 3.5 kts의 경우 마찰저항이 0.00382, 7 kts의 경우 0.00335로 유사하게 추정한 것을 확인 할 수 있다.

Table 2.5 Total drag calculation on 7 kts

Test case	CP	CF	CT	S'(m ²)
model 1-1	0.00455	0.00384	0.00839	0.406
model 1-2	0.00460	0.00355	0.00815	0.426
model 2-1	0.00425	0.00375	0.00800	0.416
model 2-2	0.00431	0.00349	0.00780	0.436
model 3-1	0.01128	0.00369	0.01496	0.516
model 3-2	0.01099	0.00342	0.01442	0.536
model 4-1	0.01273	0.00358	0.01630	0.520
model 4-2	0.01240	0.00332	0.01572	0.540

Table 2.6 Total drag calculation on 7 kts

Test case	CP	CF	CT	S'(m ²)
model 1-1	0.00451	0.00322	0.00773	0.406
model 1-2	0.00456	0.00297	0.00753	0.426
model 2-1	0.00422	0.00314	0.00736	0.416
model 2-2	0.00430	0.00292	0.00721	0.436
model 3-1	0.01023	0.00313	0.01335	0.516
model 3-2	0.01008	0.00294	0.01302	0.536
model 4-1	0.01157	0.00303	0.01461	0.520
model 4-2	0.01139	0.00285	0.01424	0.540

저항계수(C_D)는 다음의 식(2-46)을 이용해서 구할 수 있으며, 본 연구에 사용된 선체의 저항계수는 약 0.3360이다.

$$C_D = \frac{Drag}{0.5\rho U^2 S} \quad (2-46)$$



제 3 장 역시물레이션을 이용한 무인잠수정의 운동성능 확인

3.1 역동역학과 역시물레이션

동역학은 주어진 외력에 대하여 시스템의 응답 또는 운동의 특성을 해석하는 정동역학(Forward dynamics)과 반대로 시스템이 원하는 운동을 하기 위해서 필요한 구동력 및 토크를 얻는 역동역학(Inverse dynamics)으로 구분된다. 정동역학은 일반적인 시스템 해석 및 시물레이션 등에 이용되며, 역동역학은 액추에이터의 설계 및 동적제어에 필요한 정보를 얻는데 사용된다. 역동역학은 로봇 매뉴플레이터의 특성을 파악하기 위한 연구를 시작으로 현재는 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있으며, 로봇팔의 움직임 최적화 분야, 운동역학 분야에서도 적용되어 연구되고 있다. 현재에는 의공학 분야에서 의족 또는 의수의 개발에 이용되고 있으며, 또한 이족보행로봇의 보행분석에도 많이 사용되어지고 있다. 그리고 역시물레이션 방법은 오래 전부터 많은 연구들이 이루어지고 있으며, 항공역학에서는 특정경로 즉, 항공기의 성능평가를 위한 비행경로를 이동하는 비행기에 필요한 제어동작(입력)을 시물레이션을 통해서 결정하는데 사용된다(Thomson and Bradley, 2006). 역시물레이션 방법은 특별한 시스템의 응답특성을 달성하기 위한 제어동작을 계산하는데 사용된다. 역시물레이션 기법은 다양한 분야에 걸쳐서 유용하게 적용되고 있다. 헬리콥터의 운항능력 평가, 조종능력, 전장에서의 활용과 개념설계 단계에서 다양한 데이터를 추출하기 위해서 사용되고, 엔진 고장 시 이륙에 필요한 제어동작을 계산하고, 항공기의 성능을 평가하는데 사용된다.

다음 Fig. 3.1은 동역학시스템의 시물레이션의 종류별 블록다이어그램을 나타내고 있다. 일반적인 시물레이션(Forward simulation)은 다음의 Fig. 3.2와 같이 알고 있는 모델에 사용자가 지정한 입력(force on mass $f(t)$)을 주는 경우에 출

력 값(mass position $x(t)$)을 구하는 시뮬레이션 방법을 말한다. Fig. 3.1 (b)는 어떠한 시스템에 주어지는 입력 값과 시스템의 출력 값을 알고 있다면, 두 값의 관계를 이용하여 시스템을 확인할 수 있는 평가 방법이다. Fig. 3.1 (c)는 역시뮬레이션(Inverse dynamics) 기법을 나타내는 블록다이어그램으로 원하는 출력 값을 얻기 위해 시스템에 요구되는 입력 값을 구하는 방법으로 Fig. 3.2에서 질량을 원하는 거리인 $x(t)$ 만큼 이동시키기 위한 입력 값 $f(t)$ 를 구하는 방법이다.

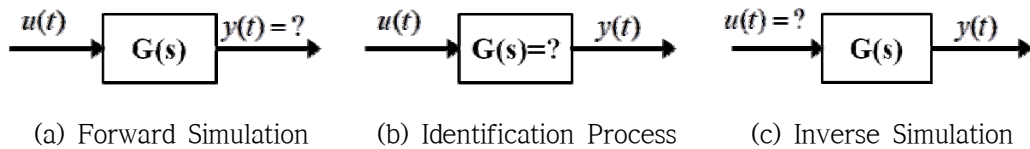


Fig. 3.1 Dynamic systems simulation types and identification

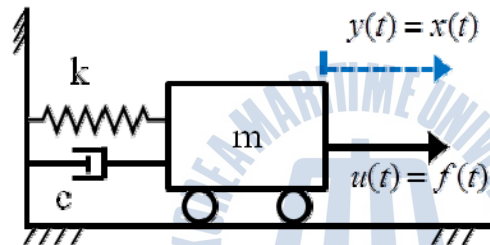


Fig. 3.2 Mass-spring-dashpot model

일반적인 시뮬레이션은 제어입력이 무인잠수정의 운동방정식을 통해 계산되어 각각의 출력값(상태벡터)들을 내보내며, 역시뮬레이션은 주어진 이동경로가 운동방정식과 추진기의 모델식을 통해 상태벡터와 추진기에 대한 입력값을 출력으로 내보낸다. 역시뮬레이션의 가장 큰 장점은 경로와 운항속도가 정해진 경우 운항에 필요한 제어입력 값과 상태를 계산할 수 있다는 것이다. 이 방법을 이용하면, 동일한 경로에 대해서 운항하는 무인잠수정의 특성을 파악할 수 있고, 동일 경로에 대한 반복 시뮬레이션을 통해서 제어입력과 운동상태를 확인하여 비교할 수 있다. 특히, 무인잠수정 개발단계에서 운용에 필요한 추진기의 용량을 산정하는데 사용된다.

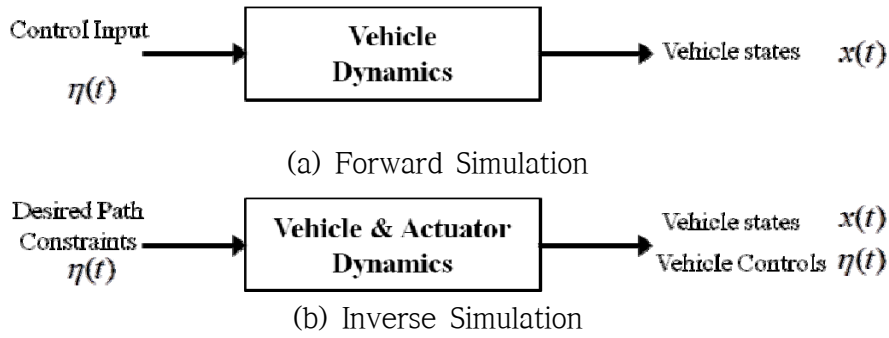


Fig. 3.3 Forward and inverse simulation

본 연구에서는 이러한 역동역학을 이용한 시뮬레이션 기법을 이용하여, 무인잠수정의 운동성능을 해석하였으며, 이를 바탕으로 무인잠수정의 설계 및 시험평가 단계에서 필요한 무인잠수정의 설계파라미터를 찾는 방법으로 역시뮬레이션 기법을 활용하였다. 원하는 이동경로가 주어졌을 때 무인잠수정의 이동에 요구되는 추진기의 힘 또는 토크를 구해서 추진기의 용량 또는 무인잠수정의 설계 파라미터에 영향을 주는 요소들을 찾아내어 설계에 반영하게 된다.

대부분의 기계시스템은 위치와 속도에 연관된 기구학 식과 외력과 입력에 대한 가속도에 관련된 식으로 이루어져있다.

$$\dot{\sigma}(t) = f(\sigma(t), \omega(t)) \quad (3-1)$$

$$\dot{\omega}(t) = g(\sigma(t), \omega(t)) + h(\sigma(t), \omega(t), u(t)) \quad (3-2)$$

위 식에서 σ, ω 는 각각 위치와 속도에 관련된 항이고, u 는 제어입력이다. 식(3-1)을 두 번 미분하면 다음 식(3-3)과 같다.

$$\ddot{\sigma}(t) = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dot{\sigma}(t) + \frac{\partial f}{\partial \omega} \dot{\omega}(t) \quad (3-3)$$

일반적으로 무인잠수정의 역시뮬레이션에서 경로는 시간에 따른 위치와 속도 $(\sigma(t), \omega(t))$ 로 표현되며, 이 값은 위치와 속도의 초기 값 $(\sigma(t_0), \omega(t_0))$ 과 시간에 따른 입력 $(u(t))$ 이 운동방정식과 관련된 함수로 나타낼 수 있다. 기 설정된 경로 $\sigma(t)$ 를 미분하면, $\dot{\sigma}(t), \ddot{\sigma}(t)$ 를 얻을 수 있으며, 식(3-1)과 식(3-3)을 풀면 알고

있는 $\sigma(t), \dot{\sigma}(t), \ddot{\sigma}(t)$ 를 이용하여 설정된 경로를 이동하는데 필요한 속도와 가속도($\dot{\omega}(t), \ddot{\omega}(t)$)를 구할 수 있다. 그리고 식(3-2)를 이용하면 입력 $u(t)$ 를 구할 수 있다.

본 논문에서 무인잠수정의 역시물레이션에 이용되는 역동역학 운동방정식은 다음과 같다.

$$\tau = M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\Theta) \quad (3-4)$$

역시물레이션 기법은 운용 개념에 따른 운용 목적과 방법이 정해져 있는 시스템이기 때문에 위에서 언급한 역시물레이션 기법을 이용하여 주어진 경로를 이동하는 무인잠수정의 움직임에 필요한 입력인 추력을 구하게 된다. 역시물레이션은 무인잠수정의 6자유도 운동방정식인 식(3-5)를 이용하여 시스템의 출력이 정해져 있는 경우에 목표 이동경로를 이동하는 시스템에 필요한 출력을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J(\eta)\nu \\ M^{-1}\{-(C(\nu) + D(\nu))\nu - g(\eta) + \tau\} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

역시물레이션 기법은 위 식(3-5)에서 주어진 경로를 이동하는데 필요한 추력인 τ 를 구하는 것이다. 일반적인 비선형 운동방정식 식(3-6)에서 시간에 따라 정의된 목표 이동경로 y_{des} 가 정해진 경우 출력방정식은 다음 식(3-7)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u), & x(0) &= x_0 \\ y &= g(x) \end{aligned} \quad (3-6)$$

$$\dot{y} = \frac{dg}{dx} \dot{x} = \frac{dg}{dx} f(x, u) \quad (3-7)$$

식(3-7)을 입력 u 로 다시 정리하면 다음 식(3-8)과 같이 쓸 수 있고, 식(3-6)에 대입하면 식(3-9)와 같다.

$$u = h(x, \dot{y}) \quad (3-8)$$

$$\dot{x} = f(x, h(x, \dot{y}_{des})) = F(x, \dot{y}_{des}) \quad (3-9)$$

3.2 역동역학 시뮬레이션 설계

일반적으로 기뢰를 제거하기 위한 무인잠수정의 이동은 모선에서 출발하여 해저에 있는 기뢰에 접근하는 경로로 다음 Fig. 3.4와 같다. 진수 된 무인잠수정이 초기에 기뢰를 향하도록 방향을 설정하고, 해저 기뢰가 매설된 지역으로 잠항하여 이동한다. 본 논문에서는 해저에 매설된 해저기뢰를 제거하기 위해 이동하는 경로를 설정하고, 그 경로를 운항하는데 필요한 무인잠수정의 설계 파라미터와 최적의 경로를 산출하기 위한 방법으로 역동역학을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해서 전진방향의 운항에 대한 이동 성능을 확인하기 위해 필요한 추진기의 추력을 확인할 수 있도록 무인잠수정의 진수에서 목표점 도달까지의 상태에 대한 성능 해석을 통해 선체 양쪽에 부착된 수평방향 추진기의 추력을 산출 하였고, 선회 성능을 확인하기 위해 방향각의 변화에 대한 추진기의 추력 분포를 획득하기 위한 방법으로 일정한 속도로 주행하는 무인잠수정에 방향각을 변화시킬 때 필요한 추진기의 추력을 역동역학 시뮬레이션을 통하여 산출하였다. 마지막으로 잠항 성능을 확인하기 위해 심도와 피치각에 대한 변화가 있을 때 필요한 수직방향 추진기의 추력과 선체내부 질량이 동장치의 이동거리를 역시뮬레이션을 통해 확인하였다.



Fig. 3.4 Operation concept of mine disposal vehicle
(Source : <http://www.kongsberg.com>)

위의 세 가지 경우에 대한 시뮬레이션을 통해 무인잠수정의 이동에 필요한 최적의 입력 파라미터를 구하였다. 또한 주어진 경로를 이동하는 무인잠수정에 대하여 주어진 경로를 이동하는데 최적의 입력을 사용하는 경우와 최대 입력을 이용하여 이동하는 경우에 대한 비교를 수행하였다.

본 연구에서 사용된 무인잠수정은 직진방향 추진기가 좌·우에 각각 80N의 추력을 갖는 추진기가 장착되고, 수직추진기는 20N의 추력을 갖는 추진기가 장착되어있다. 수직추진기는 수직방향운동의 보조적인 수단으로 사용되고, 최종 단계에서 심도유지를 위한 용도로 사용되기 때문에 작은 용량을 갖는 추진기를 선정하였다. 또한 피치각 제어를 위한 질량이동장치는 설치 공간을 고려하여 최대 30cm(전후 15cm)의 이동이 가능하다. 이와 같이 설계 초기 단계에 설정된 제어 입력인 추진기의 용량과 질량이동장치의 이동거리에 대하여 무인잠수정이 이동하는 동안에 설계치를 어느 정도 사용하는지에 대한 비교를 역시뮬레이션을 이용하여 확인하였다.



3.2.1 전진방향 운동에 필요한 추력 분석

본 연구에서 사용된 무인잠수정의 직진방향에 대한 이동성능을 확인하기 위하여 전진방향의 가속도 변화에 따라 추진기에서 발생하는 추력의 변화를 역동역학 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 기뢰제거를 위한 무인잠수정은 초기에 정지 상태에서 출발하여 점점 속도를 증가시키면서 운동을 한 후 일정 속도에 도달하면 등속운동을 수행한다. 일정 시간동안 등속운동을 수행한 후에 무인잠수정이 목표물에 가까워지면 속도를 점차 감소시킨 후 정지하도록 진행방향의 운동을 수행하게 된다. 이러한 운동을 위해서 다음 Fig. 3.5와 같은 속도 프로파일을 갖는다.

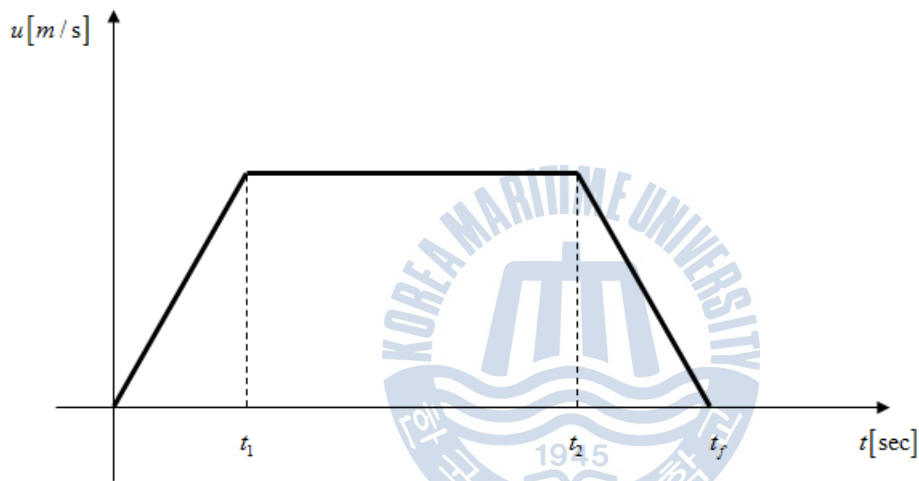


Fig. 3.5 Designed velocity profile for surge motion

역동역학 시뮬레이션을 통해 좌·우 추진기에서 발행해야하는 추력을 구하기 위해서 위 그림과 같은 속도 프로파일뿐만 아니라 해당 속도를 갖기 위한 위치 궤적과 속도, 가속도를 다음 Fig. 3.6 ~ Fig. 3.8과 같이 설정하였다. Fig. 3.6은 시간에 따른 직진방향 이동궤적을 보여주고 있으며, 가속도의 변화에 따른 직진방향의 이동성능을 확인할 수 있다. Fig. 3.7 ~ Fig. 3.8은 속도와 가속도에 대한 목표 값을 나타내는 그래프이다.

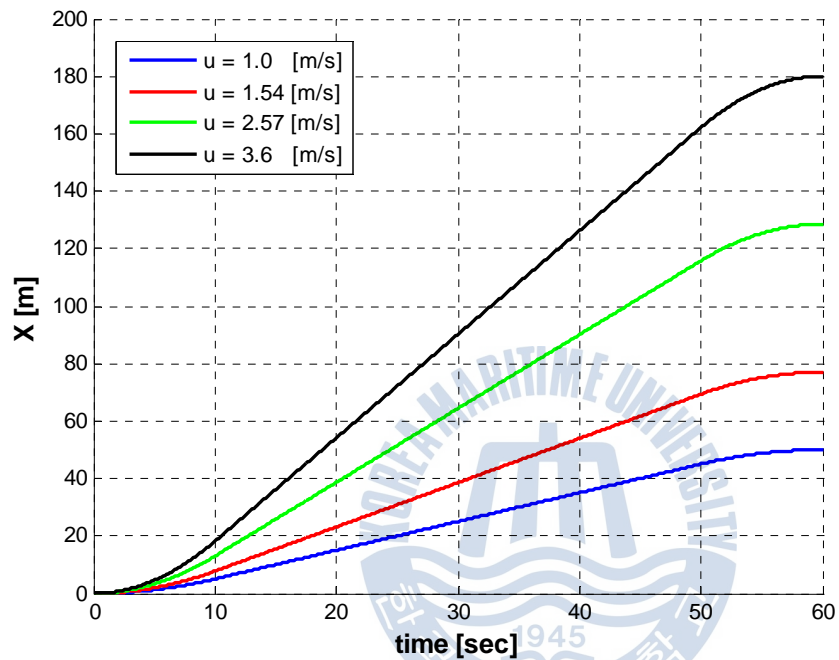


Fig. 3.6 Position trajectory for surge motion

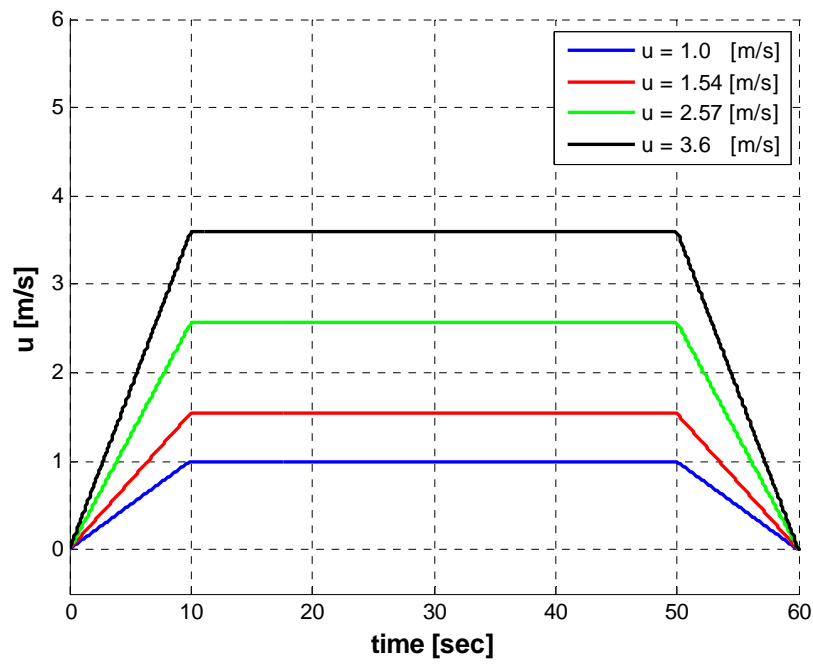


Fig. 3.7 Velocity profiles for surge motion

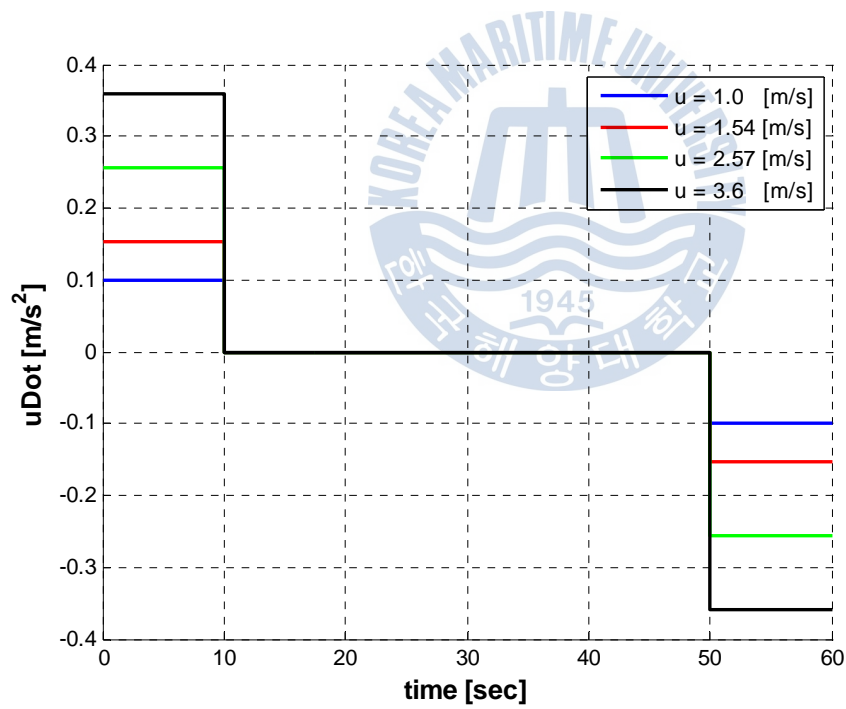


Fig. 3.8 Acceleration profiles for surge motion

Fig. 3.9 ~ Fig. 3.10은 위의 그림에 나타난 위치, 속도, 가속도 프로파일에 따른 역시물레이션에 의해 선체 좌·우에 부착된 수평추진기에서 발생한 추력의 변화를 나타낸 결과이다. 방향각의 변화가 없다고 가정했기 때문에 좌·우 추진기에서 발생하는 추력의 크기와 회전 방향은 동일하며, 속도의 변화가 빠를수록 추진기에서 발생하는 추력의 크기는 점점 증가하게 된다. 무인잠수정이 정지 상태에서 출발하여 2.57m/s의 크기를 가질 때까지 일정하게 속도가 증가할 경우 최대 발생하는 추진기의 추력은 약 32N이고, 정상상태에서 무인잠수정이 2.57m/s의 일정한 속도를 유지할 경우에 추진기에서 발생하는 추력의 크기는 약 26N이다. 마지막 단계에서는 감속도 운동을 하는 무인잠수정의 속도는 줄어들기 때문에 추진기에서 발생하는 추력의 크기도 점점 감소하게 된다. 이 결과에서 살펴보면 무인잠수정에 장착된 추진기의 최대 추력은 80N을 갖도록 설계되었기 때문에 최대 7노트를 내기 위한 추력은 충분히 발생하고 있음을 확인 할 수 있으며, 약 20N 정도의 여유 추력을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 이 여유 추력은 조류가 있는 지역에서의 속도요구 조건을 충족시키는데 사용될 수 있다. 또한 가속도가 가속, 등속, 감속구간으로 구분되는 경우의 추력의 차이가 발생하게 된다. 가속구간에서는 잠수정이 이동하는데 필요한 무인잠수정의 질량에 부가질량이 더해지게 되고, 이 때 가속도에 의해 발생하는 힘에 의해서 추력이 추가로 필요하게 되며, 감속구간에서는 추력이 덜 필요하게 된다. 따라서 가속운동이 급격히 변하는 구간에서는 질량과 부가질량, 가속도의 변화에 의해서 추력이 급격히 변하는 현상이 나타난다.

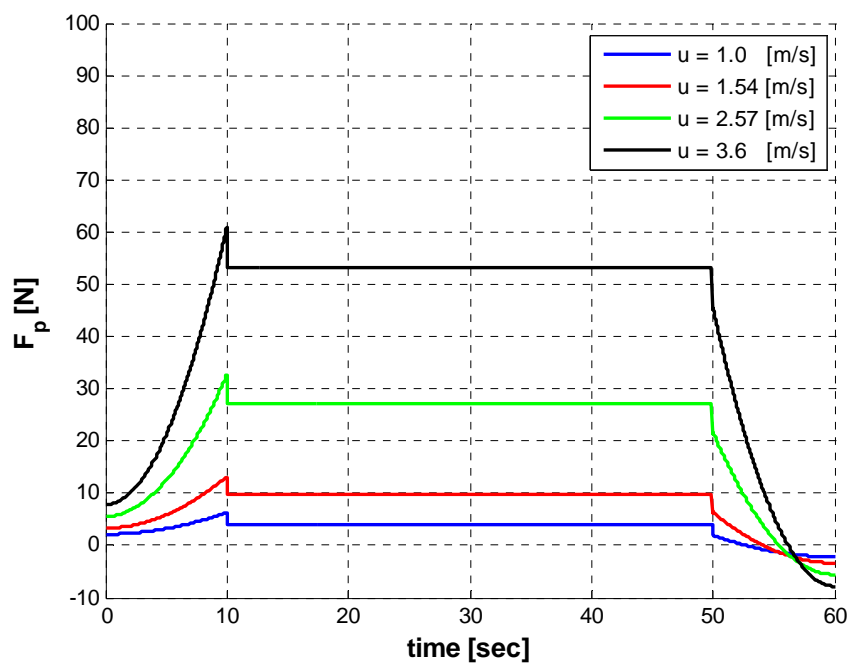


Fig. 3.9 Generated propulsion force of port thruster

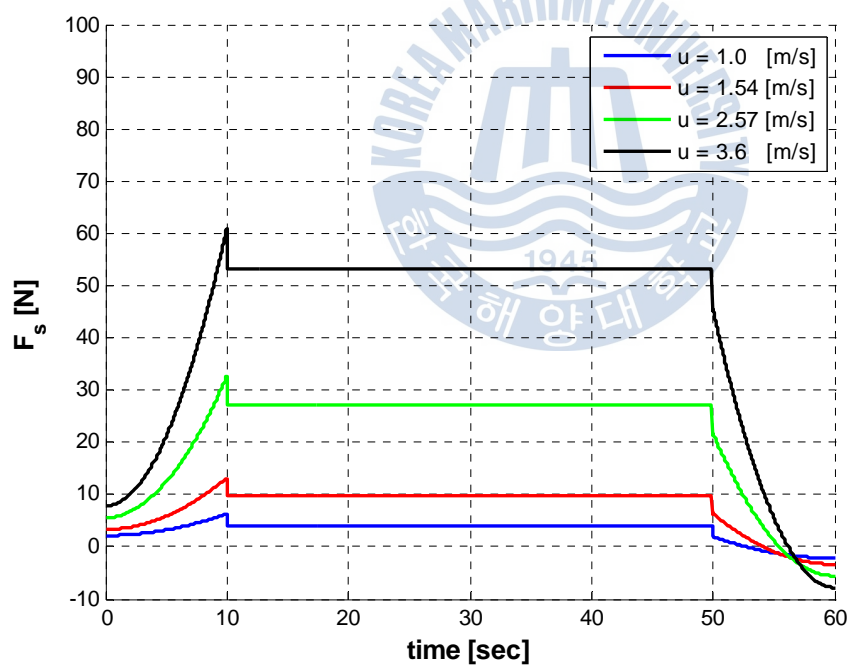


Fig. 3.10 Generated propulsion force of starboard thruster

3.2.2 선회운동에 필요한 추력 분석

두 번째로 무인잠수정의 선회운동 성능을 확인하기 위하여 무인잠수정이 운항 중에 방향각에 대한 변화가 있을 경우 좌·우 수평추진기에서 발생하는 추력을 역동역학 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

선회운동 성능을 해석하기 위해 무인잠수정은 직진방향으로 1m/s의 일정한 속도로 운항하고, 방향각이 시간이 변함에 따라 다음 식 (3-10)과 같은 5차 다항식 형태로 변화하도록 설정하였다.

$$\psi(t) = \left[6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \right] \cdot h_\psi \quad (3-10)$$

위 식에서 t_f 는 총 시뮬레이션 시간을 나타내고, h_ψ 은 최대 방향각 변위를 나타내기 위한 파라미터이다. 위의 5차 다항식을 이용한 방향각 궤적은 다음 Fig. 3.11과 같은 형태를 갖게 된다.

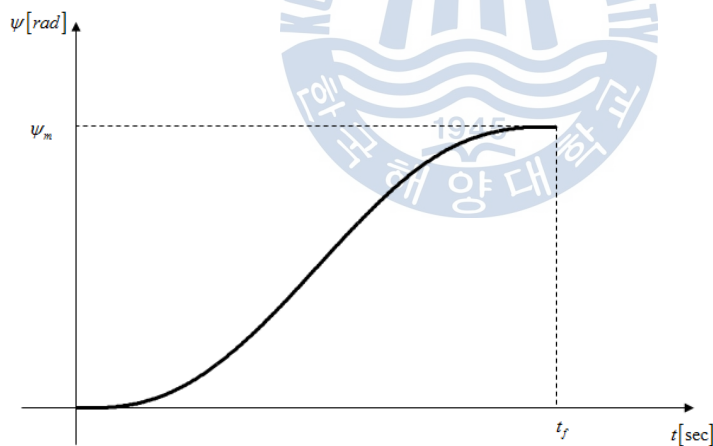


Fig. 3.11 Designed heading angle trajectory for yaw motion

잠수정이 일정한 속도를 유지하면서 위 그림과 같은 방향각과 각속도 및 각가속도를 무인잠수정이 추종하기 위해 무인잠수정의 선체 좌·우에 부착된 수평추진기에서 발생해야하는 추력을 역동역학 시뮬레이션을 통해 구할 수 있으며, 이에 대한 결과를 다음 그림들에 나타내었다.

Fig. 3.12 ~ Fig. 3.14는 횡방향 운동에 대한 각도 궤적, 각속도 및 각가속도 프로파일을 나타낸다. 무인잠수정의 선회운동 성능을 확인하기 위해 주어진 경로를 이동하는 일정한 속도로 이동하는 무인잠수정의 방향각을 Fig. 3.12와 같이 변화시키기 위해 필요한 추력을 구하기 위한 역동역학 시뮬레이션을 수행하였다.

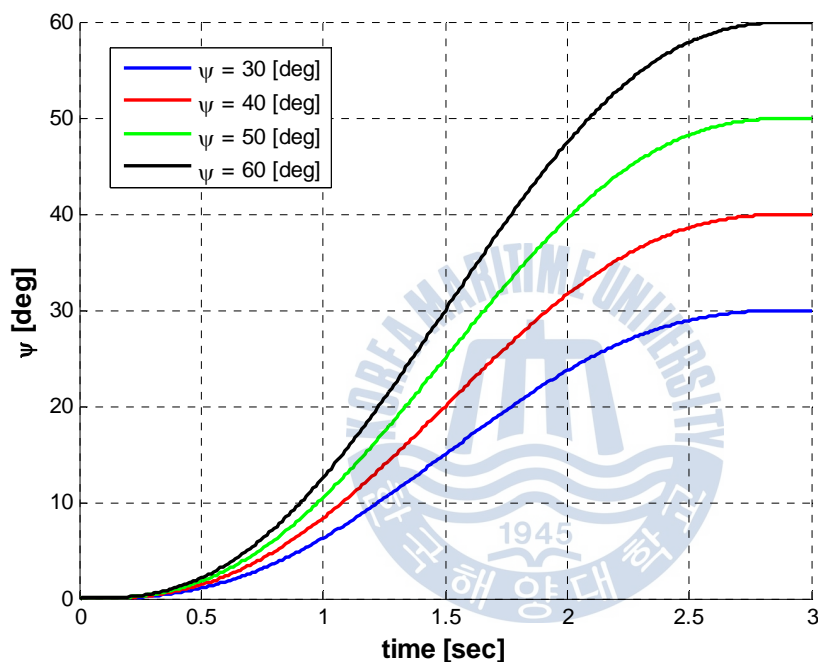


Fig. 3.12 Heading angle for yaw motion

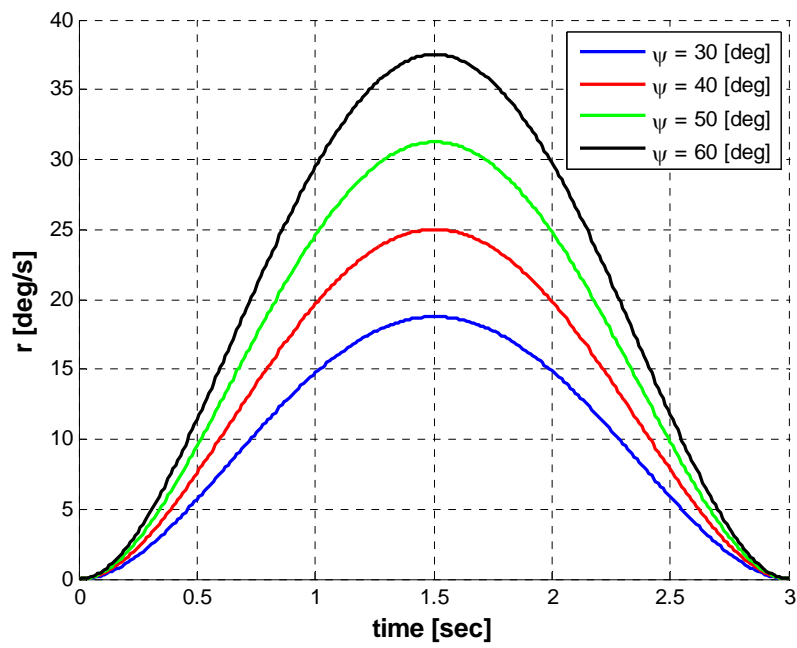


Fig. 3.13 Yaw rates for yaw motion

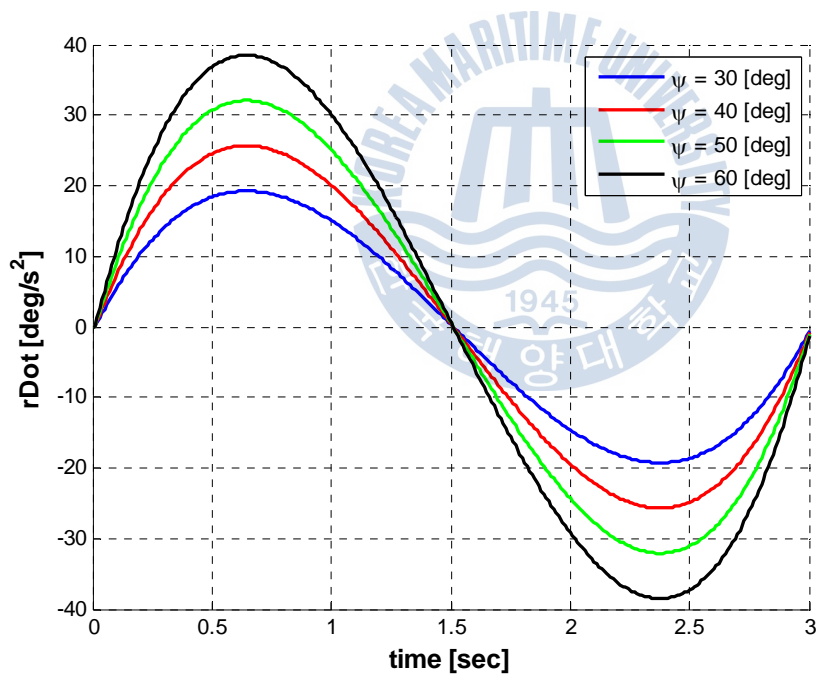


Fig. 3.14 Yaw angular rate for yaw motion

Fig. 3.15와 Fig. 3.16은 목표 방향각, 각속도 및 각가속도 프로파일을 추종할 수 있도록 역동역학 시뮬레이션에 의해 무인잠수정에 부착된 좌·우 수평추진기에서 발생한 추력의 변화를 나타낸 결과이다. 진행방향으로는 1m/s의 일정한 속도를 유지하도록 하면서 방향각을 따라가기 위해서는 좌·우 추진기에서 발생하는 추력이 반대 방향으로 발생해야 하며, 방향각의 크기가 클수록 추진기에서 발생하는 추력은 점점 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 무인잠수정이 일정한 속도를 유지하면서 60° 의 최대 방향각에 도달하기 위해서는 약 58N의 추력이 필요하게 된다. 이 결과에서 무인잠수정이 운항 중에 방향을 전환하기 위해 필요한 추력을 추정할 수 있으며, Fig. 3.15 ~ Fig. 3.16과 같이 선회 각이 증가하면서 선회운동에 필요한 추력은 점점 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 잠수정이 이동하면서 짧은 시간에 방향각을 원하는 각도로 변경하기 위해서 필요한 추력은 다음 Fig. 3.15 ~ Fig. 3.16과 같이 현재 선정된 추진기의 추력으로 충분히 빨리 방향전환이 가능함을 확인할 수 있다. 잠수정의 좌·우에 부착된 추진기는 방향전환 시 반대로 동작하면서 빠르게 전환하게 되며, 현재 선정된 추진기의 용량은 선회운동에는 충분한 용량을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.



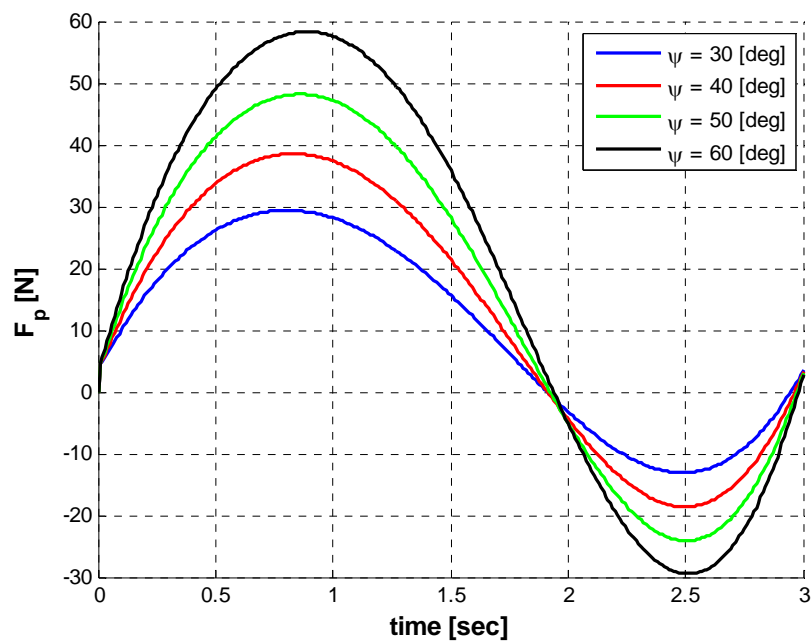


Fig. 3.15 Generated propulsion force of port thruster

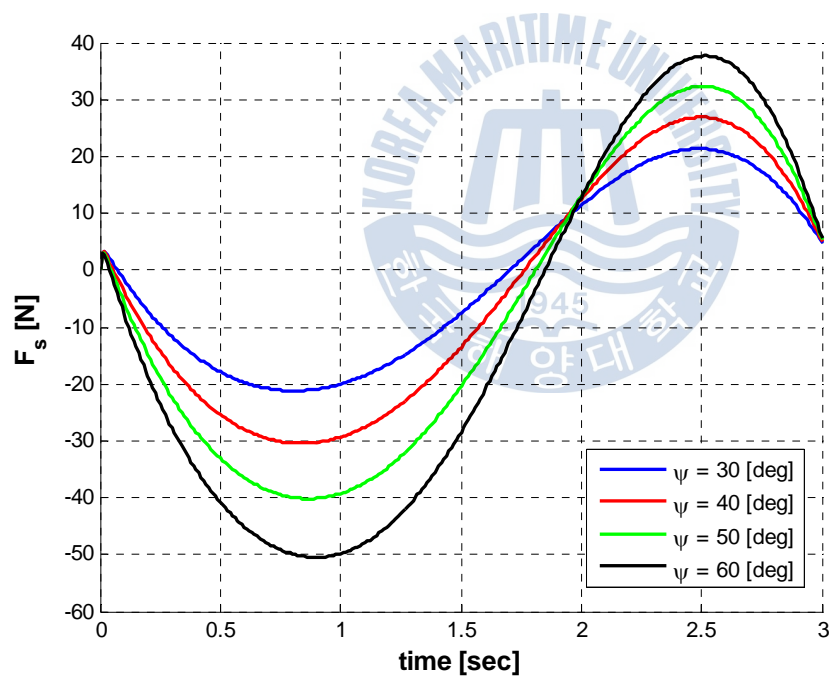


Fig. 3.16 Generated propulsion force of port thruster

3.2.3 잠항에 필요한 추력 및 질량이동장치 이동거리 분석

세 번째로 무인잠수정의 잠항 성능을 확인하기 위하여 심도와 피치각에 대한 변화가 있을 경우 수직추진기에서 발생하는 추력과 내부이동질량의 운동을 역동역학 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 잠항운동에 필요한 추력과 질량이동장치의 질량물의 이동거리를 확인하기 위한 시뮬레이션 조건은 무인잠수정이 진행방향으로는 일정한 속도를 가지고 이동하고, 방향각은 일정한 값을 유지하는 것으로 가정하였다. 또한, 무인잠수정이 잠항을 수행하기 위해서는 피치각도를 가져야 하며, 피치각도에 따른 수심도 마찬가지로 변화하게 된다. 따라서 잠항운동에 대한 성능 확인을 위해서는 수심의 변화와 피치각의 변화 두 가지 경우에 대하여 동시에 확인하여야 한다. 본 논문에서 연구하는 무인잠수정은 기뢰를 제거하기 위한 특정한 목표를 가지고 있는 무인잠수정이기 때문에 잠항운동에서는 운항과 접근 두 가지 모드의 운동이 적용된다. 우선 진수 후에 기뢰근처까지 이동하는 구간에서는 잠항을 위해서 질량이동장치만을 이용하여 피치각을 발생시켜 잠항하게 되며, 수직추진기는 목표에 접근 후 자세 유지를 위한 수단으로 사용된다. 따라서 이번 절에서는 질량이동장치만을 이용하여 잠항운동을 하는 경우에 대해서 살펴보고, 다음 절에서는 목표물 접근 후 심도를 유지하는 경우에 대한 역시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 목표심도로의 잠항 운항 시 수심은 시간이 변함에 따라 식 (3-11)과 같은 5차 다항식 형태로 변화하도록 설정하였으며, 피치각은 식 (3-12)와 같은 4차 다항식의 형태를 갖도록 설정하였다.

$$z(t) = \left[6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \right] \cdot h_z \quad (3-11)$$

$$\theta(t) = \left[30\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 - 60\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 + 30\left(\frac{t}{t_f}\right)^2 \right] \cdot \left(\frac{h_q}{t_f} \right) \quad (3-12)$$

위 식에서 t_f 는 총 시뮬레이션 시간을 나타내고, h_z 는 최대 수심을 나타내기 위한 파라미터이고, h_q 는 최대 피치각을 나타내기 위한 파라미터이다. 각각의 다항식들을 이용하여 표현한 수심과 피치각의 궤적은 다음 Fig. 3-17, Fig. 3-18과 같은 형태를 갖게 된다. 역시뮬레이션에서의 궤적은 잠수정의 물리적 운동 상태를 고려하여 최대한 비슷한 경로를 갖는 다항식을 설정하여 시뮬레이션에 적용하게 된다.

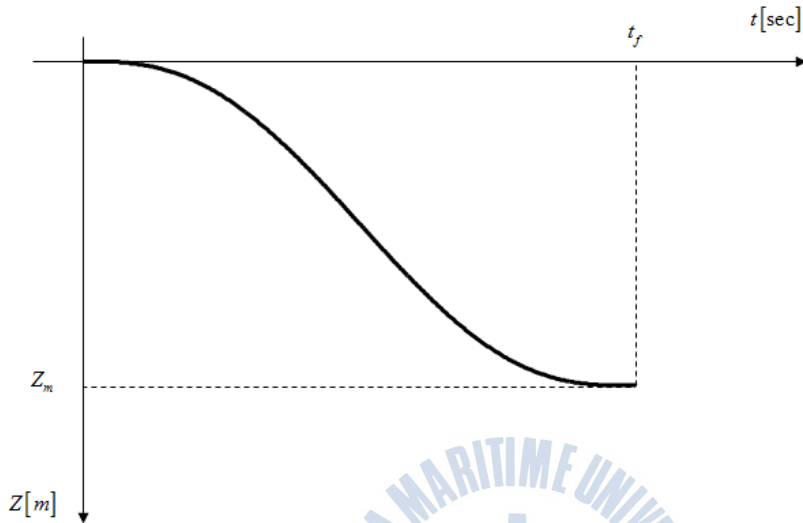


Fig. 3.17 Designed depth for heave motion

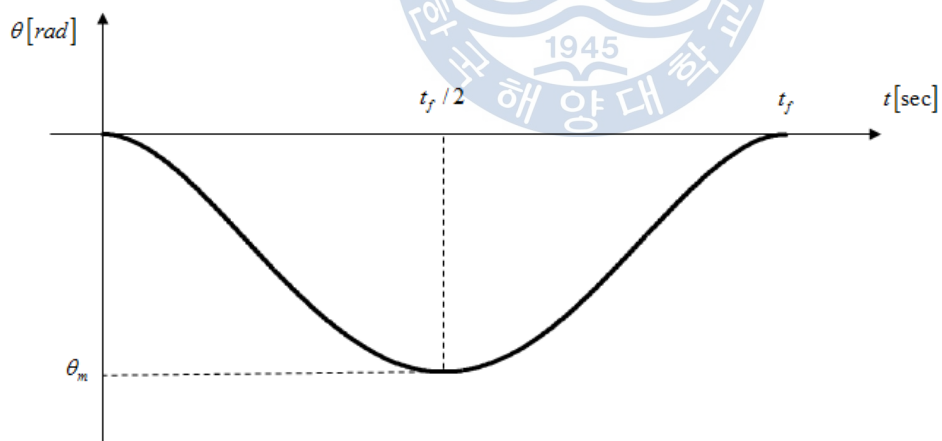


Fig. 3.18 Designed pitch angle for pitch motion

일정한 속도를 유지하면서 위 그림과 같은 수심과 피치각도를 무인잠수정이 추종하기 위해 무인잠수정에 내부에 장착된 질량이동장치에서 발생해야하는 이동거리를 역동역학 시뮬레이션을 통해 구할 수 있으며, 이에 대한 결과를 다음 그림들에 나타내었다. 먼저 Fig. 3.19 ~ Fig. 3.21은 시간에 따라 변화하는 수심과 피치각도뿐만 아니라 이에 따른 속도/각속도 및 가속도/각가속도 프로파일을 각각 나타낸다. 잠항 성능을 확인하기 위해 그림들과 같이 변수들을 변화시킴으로써 역동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째로는 수심은 현재 위치로부터 일정한 심도 5m를 잠항하도록 하였으며, 이와 같은 역동역학 시뮬레이션을 통하여 내부이동질량이 이동해야 할 위치를 구하도록 하였다.

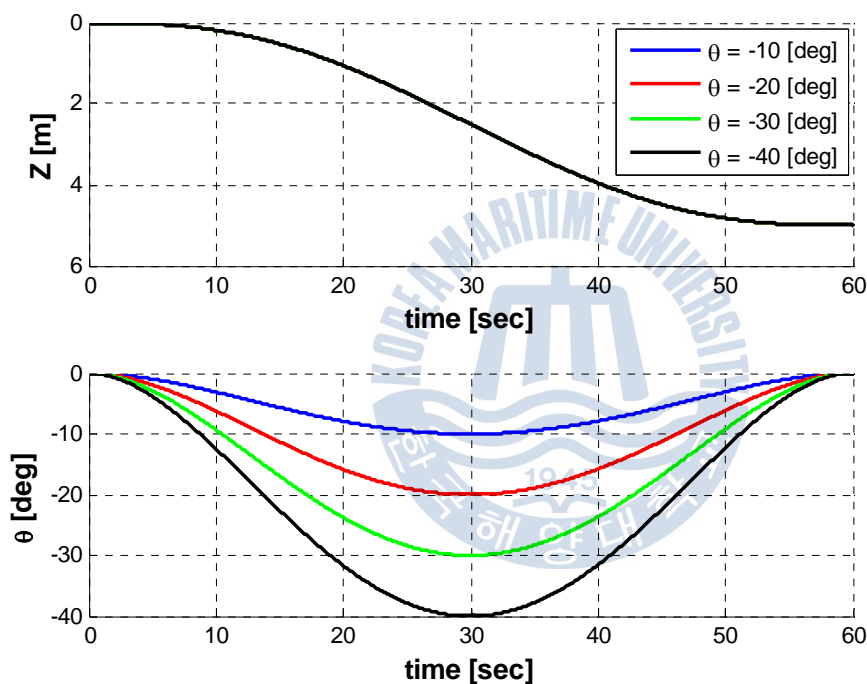


Fig. 3.19 Depth and pitch angles for submerge motion

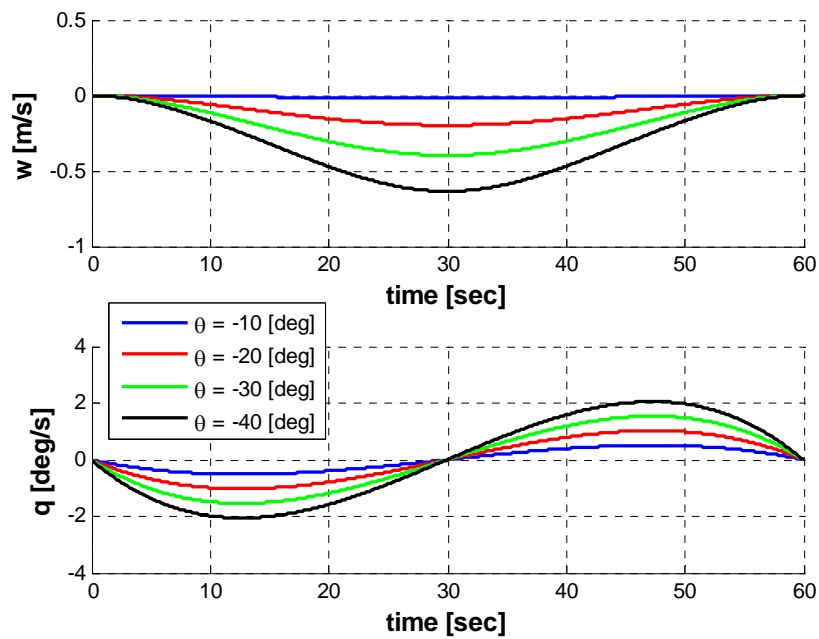


Fig. 3.20 Heave velocities and pitch rates for submerge motion

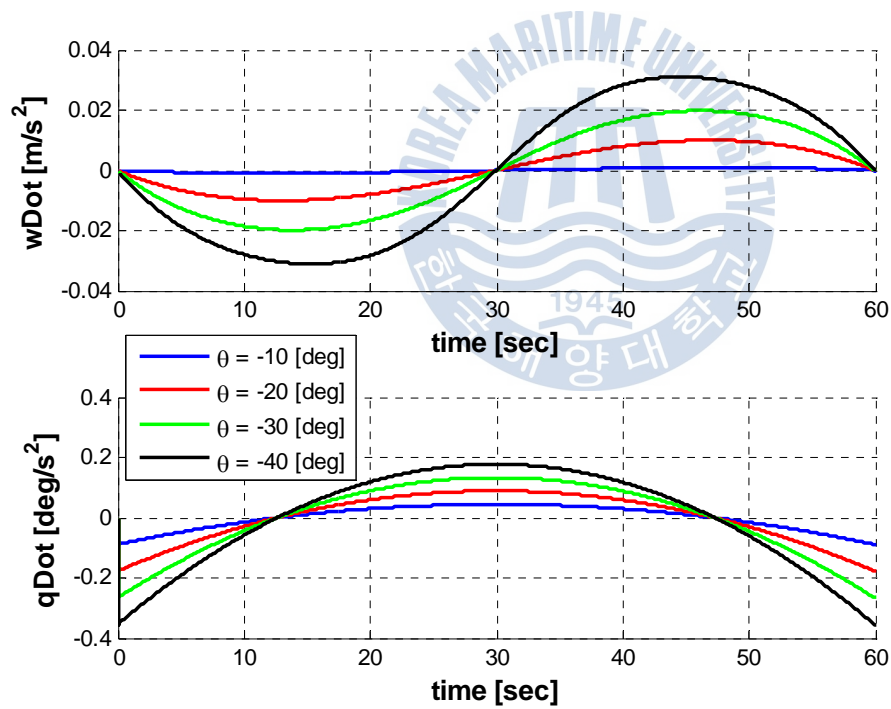


Fig. 3.21 Heave accelerations & pitch angular accelerations for submerge motion

Fig. 3.22는 목표 수심/피치각, 속도/각속도 및 가속도/각가속도 프로파일을 추종할 수 있도록 역동역학 시뮬레이션에 의해 추정된 이동 질량의 위치 변화를 나타낸 결과이다. 진행방향으로는 일정한 속도를 유지하면서 목표 수심 5m에 도달하고, 목표 피치각을 추종하기 위해서는 피치각의 크기가 클수록 내부 이동 질량이 많은 움직임이 필요하며, 무인잠수정이 1m/s의 일정한 진행방향 속도를 유지하면서 피치각 -60° 를 따라가야 하는 경우에 질량이동장치의 질량물은 선수방향으로 최대 약 11cm를 이동해야 한다. 이 결과에서 살펴보면 본 연구에서 적용된 무인잠수정의 운항에 따른 피치각 제어를 위해서 사용되는 질량 이동장치의 설계파라미터인 $\pm 30\text{cm}$ 가 적절하게 설정되었음을 확인할 수 있다.

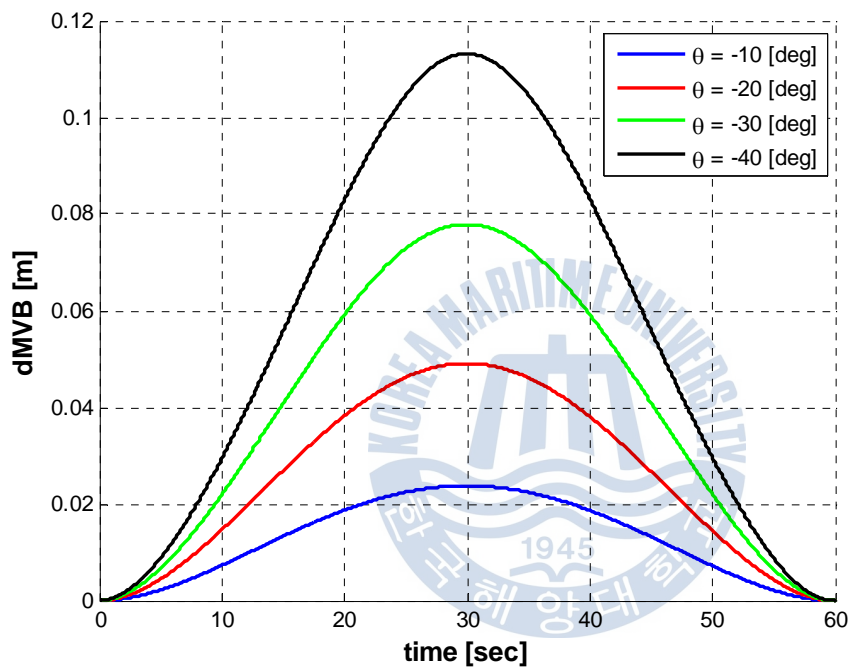


Fig. 3.22 Generated position of inner movable mass

3.2.4 수심방향 운동에 필요한 수직방향 추진기 추력 분석

마지막으로 목표물에 근접한 접근모드에서 무인잠수정의 수직방향 이동 성능을 확인하기 위하여 수심방향에 대한 궤적이 주어질 경우, 수직추진기의 추력을 역동역학 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션 조건은 무인잠수정이 목표물에 근접하였을 경우로, 특정 지점에서 무인잠수정이 정지 상태에 있으며, 이 때 모든 상태 값들은 정상상태 값을 유지하면서 수심은 시간에 따라 식 (3-13)과 같은 5차 다항식 형태로 변화하도록 설정하였다. 수심방향의 운동은 초기에 목표수심근처까지 이동하고 접근 단계에서 아래 Fig. 3.23과 같은 편차를 갖는 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

$$z(t) = \left[6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \right] \cdot h_z \quad (3-13)$$

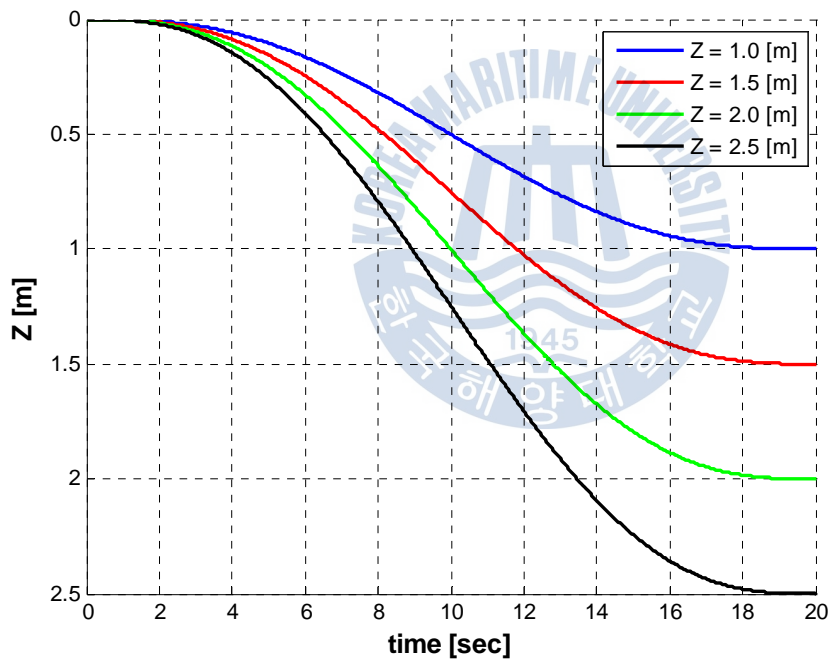


Fig. 3.23 Depth for heave motion

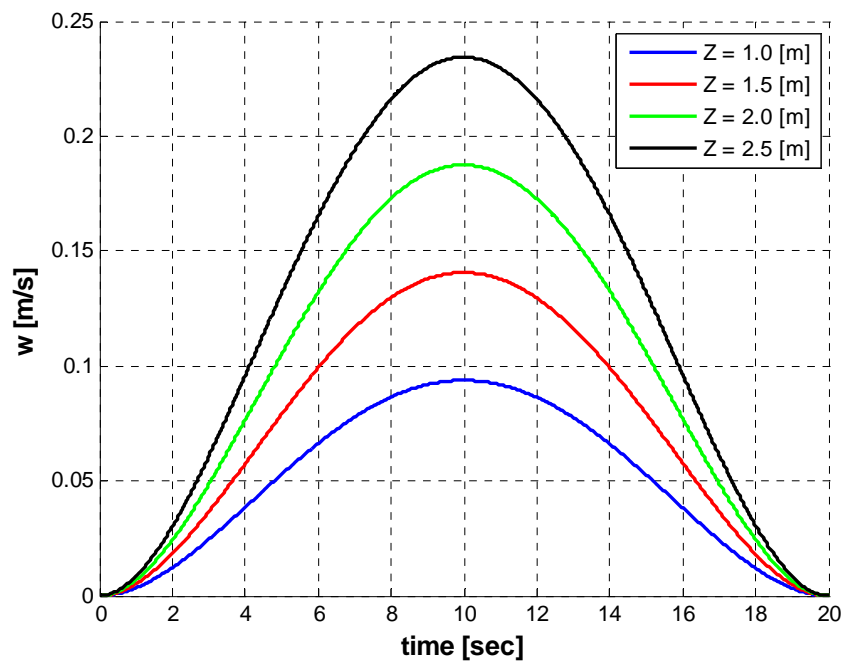


Fig. 3.24 Velocity for heave motion

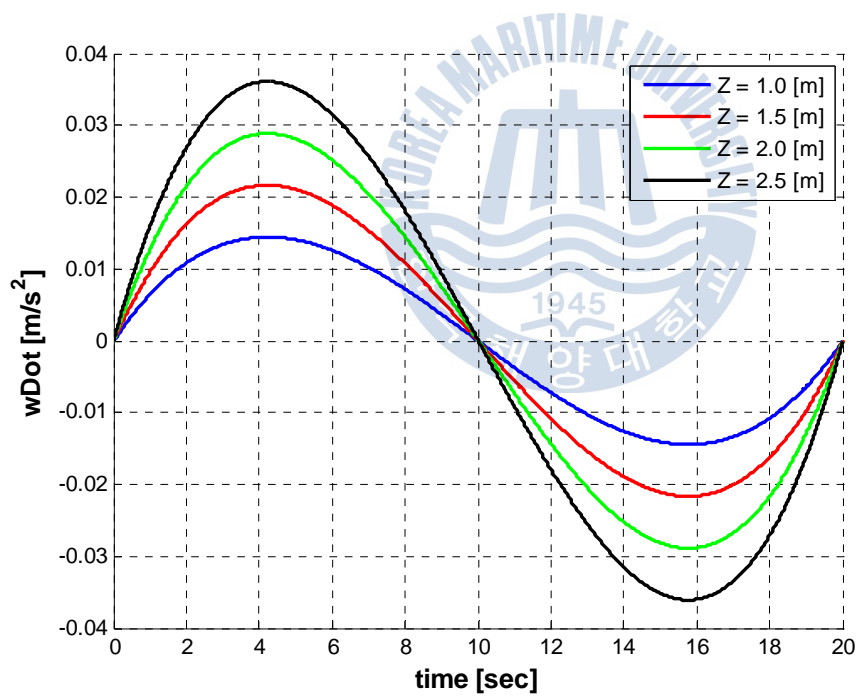


Fig. 3.25 Acceleration for heave motion

Fig. 3.26의 수직추진기의 추력에서 보면, 접근단계 이전까지 목표수심과의 오차가 2.5m 근처까지 유도되면 현재 무인잠수정에 장착된 수평추진기의 용량인 20N이 충분하게 설계되었음을 확인할 수 있다.

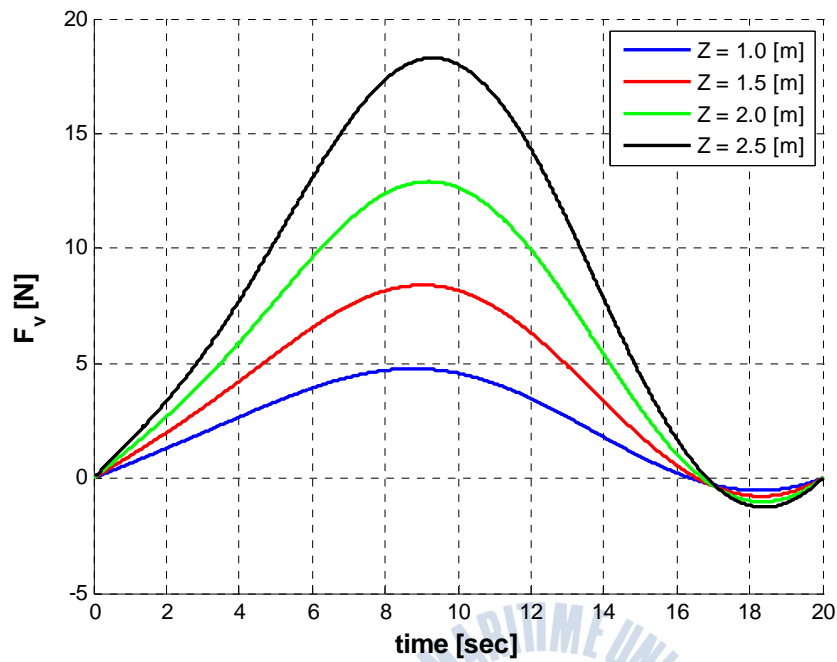


Fig. 3.26 Generated propulsion force of vertical thruster

3.3 역동역학 시뮬레이션의 적용

3.2절에서 역시뮬레이션을 통해 무인잠수정이 기 설정된 경로를 이동하는데 필요한 최적화된 파라미터를 구하였다. 수평 추진기 2개와 수직 추진기 1개, 질량이동장치가 주어진 경로를 이동하는데 필요한 출력값을 확인할 수 있었고, 출력값이 현재 설계된 추진기의 용량과 질량이동장치의 이동거리의 설계값이 타당한지 여부를 확인할 수 있었다. 다음 Fig. 3.27를 보면, 현재 설계된 추진기의 최대값과 역시뮬레이션을 이용해서 확인된 최대 출력치를 비교한 결과 평균적으로 설계된 시스템의 약 70%를 사용하는 것을 확인할 수 있다.

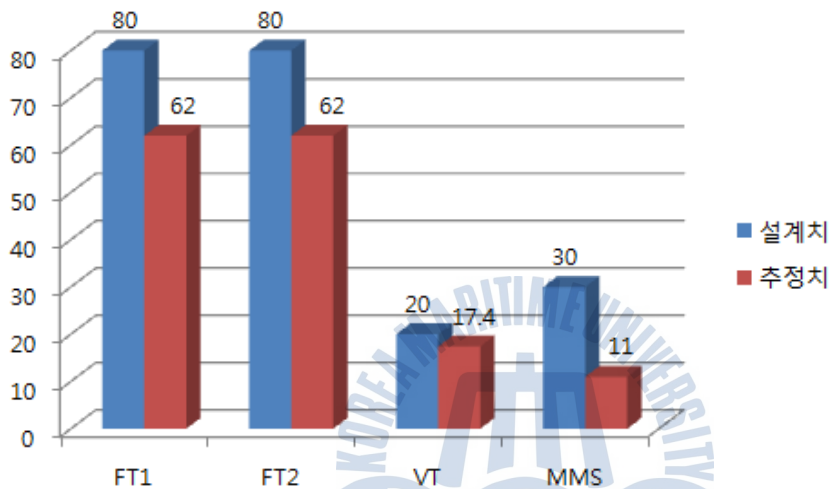


Fig. 3.27 Comparison of designed and maximum values of input system

이러한 결과를 이용하면 이동경로가 특정된 무인잠수정의 초기 설계 단계에서 설계된 추진기의 용량 및 질량이동장치의 이동허용치 등을 검토하는 중요한 자료가 될 수 있음을 확인하였다. 또한, 이 결과를 이용하게 되면 설계된 무인잠수정이 운동성능을 평가하는 방법으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 설정된 경로를 추종하는 성능에 대한 평가 수단으로도 활용이 가능함을 확인할 수 있다.

제 4 장 무인잠수정의 자세제어를 위한 제어기 설계

이 장에서는 무인잠수정의 자세제어 및 경로추종에 적용한 제어 알고리즘에 대해 고찰하고자 한다. 본 논문에서는 6자유도의 운동방정식을 이용하여 수학적 모델링을 수행하였다. 설계된 모델식을 이용해 운동성능을 해석하고, 제어기 설계를 통해 무인잠수정의 속도, 심도, 방향각제어를 위한 제어기를 설계하였으며 설계된 제어기를 적용하여 주어진 경로점을 추종하는 경로점 추종제어를 수행하였다.

4.1 운동성능 해석

무인잠수정의 6자유도 운동 시뮬레이션은 2장에서 구한 모델식을 이용하여 구현하였으며, 시뮬레이션에 사용된 모델의 계수는 유사선형인 Minesniper의 계수를 기본적으로 이용하였다. 시뮬레이션은 무인잠수정의 수학모델의 이동에 필요한 수평추진기 2개, 수직추진기 1개에 대한 입력과 질량이동장치의 위치를 입력으로 계산하도록 구성하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터와 유체력계수는 다음 Table. 4.1과 같다.

Table 4.1 Parameters and hydrodynamic coefficients of Minesniper

L	1.93m	X_u	-1.42	N_v	2.2	N_r	5
D	0.17m	Y_v	-38.4	X_{u_r}	0.1	$X_{ u_r u_r}$	8.2
m	40kg	Y_r	-2.5	Y_{v_r}	10	$Y_{ v_r v_r}$	200
m_m	1.7kg	Z_w	-42.2	Y_r	5	$Z_{ w_r w_r}$	220
z_G	0.005m	M_q	-8.9	Z_{w_r}	30	M_q	7.5
I_y	8.0	M_w	2.2	M_w	10	N_v	36
I_z	8.0	N_r	-8.9	$M_{ q q}$	20	$N_{ r r}$	15

전개된 6자유도의 운동방정식을 이용하여 무인잠수정의 운동성능을 해석하기 위하여 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. Simulink는 비선형 운동방정식의 시뮬레이션에 편리하도록 그래픽 툴을 제공하고 있으며, Matlab은 제어시스템의 해석과 설계에 강력한 툴을 많이 포함하고 있다. 따라서 이들을 활용하면 제어기 개발을 위한 시뮬레이션 환경을 용이하게 구축할 수 있다. Fig. 4.1은 개발된 Simulink 모델을 보여주고 있으며, Parameter를 설정하고 결과를 출력하는 블록, 입력값을 설정하는 블록, 6자유도의 운동방정식을 위한 블록과 좌표변환을 위한 블록으로 구성된다.

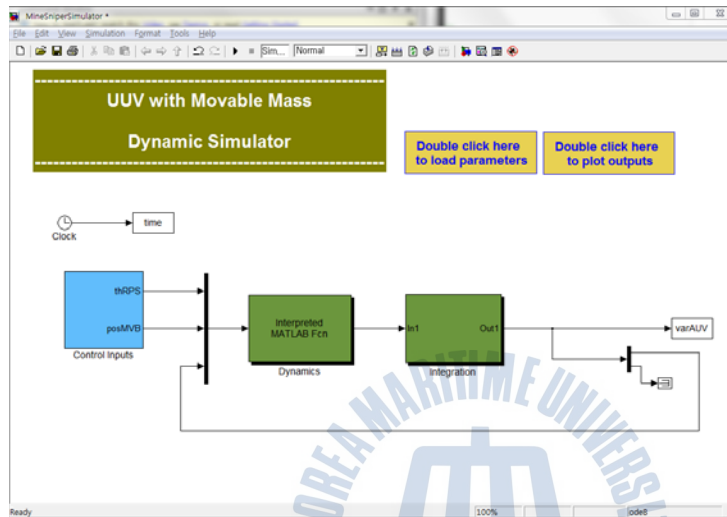


Fig. 4.1 Simulator program for UUV simulation

앞에서 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 무인잠수정의 운동에 대한 기본 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 운동성능을 해석하기 위해 주어진 입력은 선체 양쪽 추진기에 동일한 입력을 주고 50초 후에 선체 내부의 질량이동장치를 이동시켜 잠항하는 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4.2는 시뮬레이션 동안의 X-Z 평면상에서의 위치이며, Fig. 4.3은 시뮬레이션 동안의 Surge, Sway, Heave방향 속도인 u, v, w , Fig. 4.4는 Roll, Pitch, Yaw의 회전변위인 ϕ, θ, ψ 를 나타내고 있다. Fig. 4.5는 시뮬레이션 동안의 질량 이동장치의 질량물의 위치를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 모델의 정량적인 타당성은 확인할 수 없으나, 정성적인 특성은 확인할 수 있었고 본 모델을 잠

수정의 성능해석을 위한 모델로 사용할 뿐만 아니라 제어기 설계를 위한 모델과 제어기의 성능해석을 위한 플랜트모델로 사용하고자 한다.

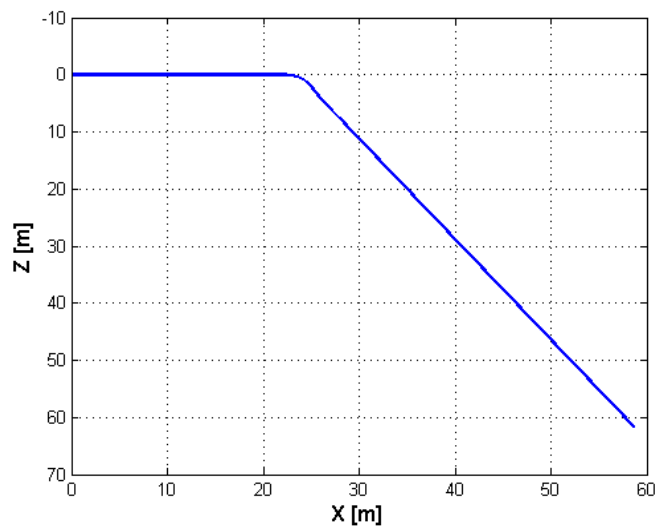


Fig. 4.2 Simulation of submerging trajectory

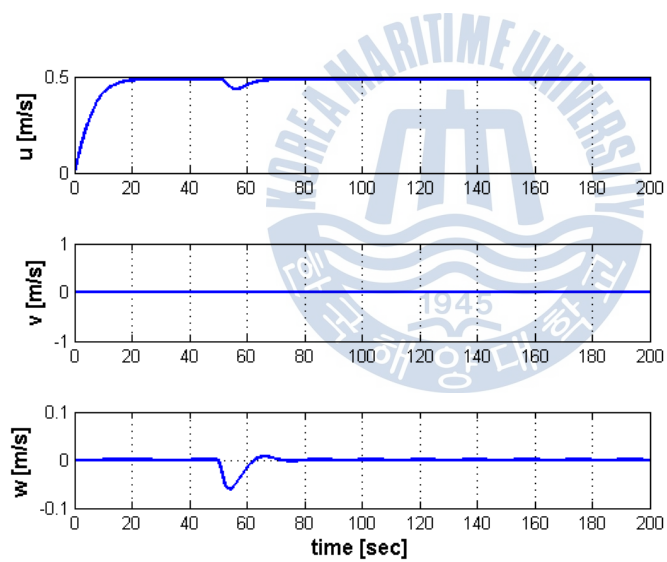


Fig. 4.3 Linear velocities of simulation results

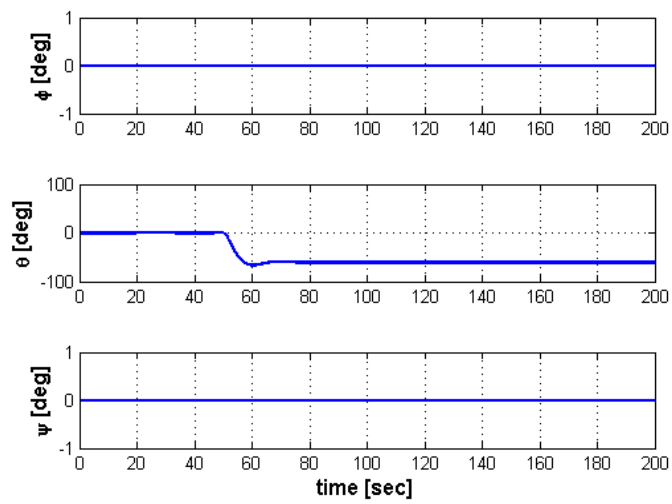


Fig. 4.4 Angles of simulation results

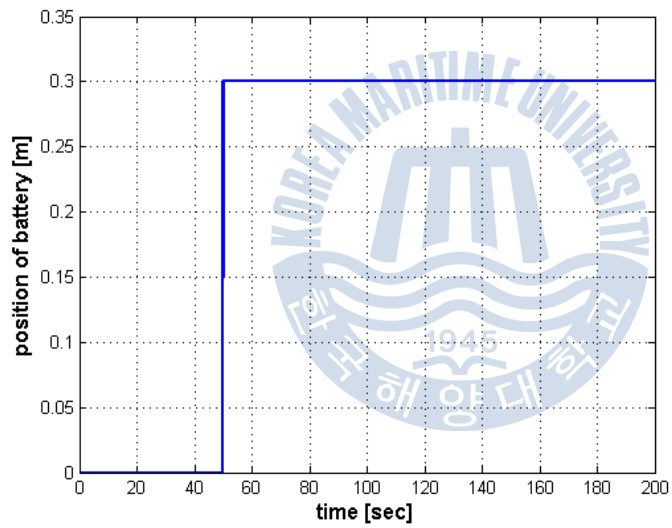


Fig. 4.5 Mass position of simulation results

4.2 제어기 설계

무인잠수정은 해양의 열악한 환경에서 자율적으로 주행하면서 임무를 수행하기 때문에 제어기 설계가 필수적이다. 무인잠수정의 동적 거동은 비선형적인 요소와 연성운동이 발생하기 때문에 자세 또는 위치를 제어하기 어려운 시스템이다. 이러한 무인잠수정의 제어를 위해서 고전적인 제어 방법을 이용하는 경우에는 무인잠수정의 운동특성을 정확히 파악하고 시스템의 모든 파라미터를 실험과 이론계산으로 추정하여 완벽한 모델링을 하는 것이 요구된다. 무인잠수정의 유체동역학계수는 운항속도, 자세 등에 의해 동특성이 변화되며, 조류의 영향에 의한 상대속도의 변화에 기인하는 양력변화 등이 시스템의 동특성에 미치는 영향도 크다. 따라서 고전적인 제어 방법은 시스템의 모델링이 정확히 이루어졌다 하더라도 운항 상태의 변화에 따라 제어가 어려워진다. 최근 무인잠수정의 제어시스템에 대한 다양한 연구가 진행되면서, 고전제어 방법 이외에 외란에 강인한 다양한 제어기 설계에 대한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 경우가 슬라이딩 모드 제어기와 퍼지 제어기 등이다. Marco와 Healey는 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 속도, 수심 및 방향 제어를 수행하였고(Marco and Healey, 1993), Lee등은 이산슬라이딩모드 제어기를 설계하고 이를 AUV에 적용하였다(Lee et al., 1999). Loc은 Fuzzy-PID 제어기를 적용하여 무인잠수정의 제어기를 설계하였다(Loc and Choi, 2012).

본 연구에서 사용되는 무인잠수정은 기뢰를 제거하는 목적으로 사용되는 소모성 무인잠수정이기 때문에 빠른 시간 내에 원하는 목표로 이동할 수 있어야 한다. 이를 위해서 가장 단순하면서도 제어가 비교적 쉬운 고전제어방법인 PID 제어기를 사용하였고, 외란의 영향을 고려하기 위해 제어기의 게인을 Fuzzy 방식을 이용하여 튜닝하는 Fuzzy-PID 제어기를 설계하였다.

4.2.1 PID 제어기 설계

PID제어는 비례(Proportional)-미분(Integral)-적분(Derivative) 제어를 의미하며, 많은 제어시스템에서 사용되고 있다. 1940년 이후 OP-Amp를 이용하여 아날로그 방식으로 구현되던 PID가 최근에는 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어 방식으로 대체되고 있다. 고전적인 제어방식인 PID 보다 정교한 현대 제어 이론들이 많이 개발되었지만 PID 제어기는 현장에서 쉽게 튜닝이 가능하고, 노이즈에 강인한 성능이 있으며, 구현이 용이한 장점이 있어 아직까지도 많이 사용되고 있다. PID 제어기는 원하는 출력 값과 실제 출력 값의 차이인 ‘오차(error)’를 이용하여 계산이 이루어지며, 제어기 설계를 위해서는 비례, 미분, 적분제어의 성능을 잘 파악하는 것이 중요하다. 비례(P)는 현재의 오차와 관계되고, 적분(I)는 과거의 오차와 관계로 정상상태 오차를 제거하고, 미분(D)는 미래의 오차를 예측한다. 비례이득은 기준 입력과 출력 결과의 오차에 비례하여 제어하는 것으로서 시스템의 안정도를 높이고, 오버슈트의 크기를 적게 한다. 또한 진동이 발생하는 경우 그 진동의 진폭을 적게 하는 기능을 갖는다. 그러나 비례 동작으로 인하여 정상상태 도달 시간이 길어지거나 정상 상태 오차가 발생하는 단점이 있다. 적분 동작의 경우, 지연 시간을 발생시켜 시스템을 진동시키기 쉽고 안정도를 저하시킨다. 이 역시 정상상태 도달 시간을 길게 한다. 즉 과도 응답 특성을 저하시킨다는 단점이 있다. 미분 동작은 오차의 시간에 대한 미분 값에 비례하여 이루어지며, 급격한 회로에 대하여 큰 제어 입력을 주어 신속하게 원래의 제어상태로 되돌아가도록 함으로써 정상상태 도달 시간을 빠르게 하는 기능을 가지나, 출력의 갑작스러운 변화를 유발하기도 한다. 결과적으로, 미분 동작은 비례 동작이나 적분 동작에서 발생하는 문제점을 해결해주는 역할을 한다. 그러므로 실제 제어를 수행하는 경우 이 세 가지 제어 동작의 상호 장단점을 보완해주기 위해 이들의 조합으로 이루어지는 PI제어, PD제어, PID제어 형태가 사용된다. 일반적인 PID 제어기의 블록다이어그램은 Fig. 4.6과 같다.

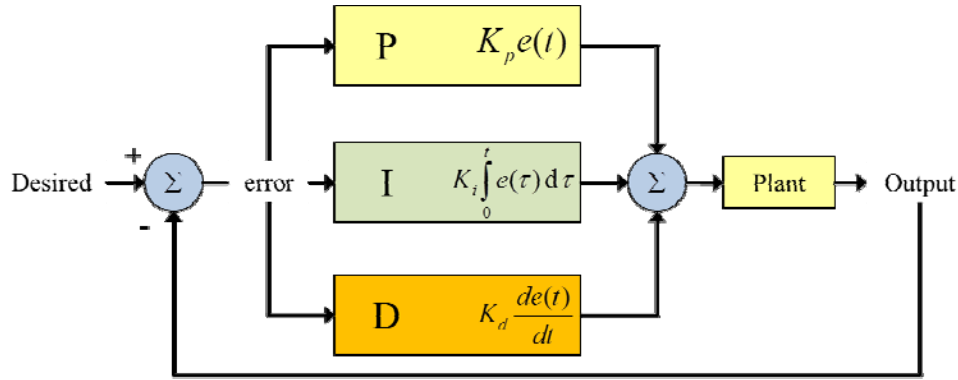


Fig. 4.6 Block diagram of PID controller

실제 시스템의 경우 적분요소가 없는 플랜트에서 단순한 비례제어기를 사용하면 일정한 입력에 대하여 정상상태 오차가 발생하게 된다. 이러한 정상상태 오차는 비례제어기에 적분제어기를 포함시킴으로써 제거할 수 있다. 플랜트 자체에 적분요소를 포함하고 있다하더라도 일정한 외란이 존재하면 정상상태 오차가 발생하게 되는데 이때에도 비례제어기에 적분제어기를 포함시키면 정상상태 오차를 제거시킬 수 있다. 미분제어기는 오차신호의 변화율을 가지고 제어하므로 오차신호의 크기가 커지기 전에 제어할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 미분제어기는 초기에 큰 제어량이 요구되지만 시스템의 안정도를 증가시키는 경향이 있다. 또한 미분제어기는 정상상태 오차에 직접적으로 영향을 주지는 못하지만 시스템에 감쇠효과를 주기 때문에 시스템 이득을 증가시킬 수 있게 한다. 그 결과 미분제어기는 정상상태 오차를 줄일 수 있는 효과도 있다. 그러나 오차신호 자체에 대하여 동작하는 것이 아니라 오차신호의 변화율에 대하여 동작하므로 미분제어기 만으로는 사용할 수 가 없다. 미분제어기는 항상 비례제어기 또는 비례-적분 제어기와 결합하여 사용해야 한다.

일반적인 PID제어기의 식은 다음 식(4-1)과 같다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4-1)$$

위 식에서,

$u(t)$: 제어 입력

e : 오차(목표값-현재값)

K_p : 비례이득

K_i : 적분이득

K_d : 미분이득 을 나타낸다.

PID 제어기의 장점은 그 구조가 매우 간단하다는 것이다. 하지만 종종 이득 값 조절(Gain tuning)이 잘못되어 있어 PID 제어기의 능력을 충분히 발휘하지 못하는 경우가 많다. 따라서 PID 제어기의 이득값을 적절히 조정하는 것이 가장 중요하다.

4.2.1.1 좌·우 추진기를 이용한 속도제어 및 방향각 제어

무인잠수정의 좌현과 우현에 장착된 추진기를 이용하여 직진방향 운동과 방향각 제어를 하게 된다. 속도제어는 다음 식(4-2)를 이용하여 잠수정의 직진방향 속도를 이용하여 제어기를 설계하였고, 방향각은 식(4-3)과 같이 방향각과 방향각의 미분값을 이용하여 제어기를 설계하였다.

$$U_u = K_{up}(u_d - u) + K_{ui} \int (u_d - u) dt + K_{ud}(\dot{u}_d - \dot{u}) \quad (4-2)$$

$$U_r = K_{rp}(\psi_d - \psi) + K_{rd}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \quad (4-3)$$

좌현과 우현 추진기의 입력은 각각 아래 식(4-4), 식(4-5)와 같다.

$$F_{port} = U_u + U_r \quad (4-4)$$

$$F_{stbd} = U_u - U_r \quad (4-5)$$

4.2.1.2 수직추진기를 이용한 수심제어

수심제어는 두 가지 입력값에 대해 각각 수행하였으며(?), 우선 수직추진기를 이용한 수심제어는 다음의 식(4-6)을 이용하였다.

$$U_z = K_{zp}(z_d - z) + K_{zi} \int (z_d - z)dt + K_{zd}(\dot{z}_d - \dot{z}) \quad (4-6)$$

이때의 수직추진기의 입력은 다음 식(4-7)이다.

$$F_{vtd} = U_z \quad (4-7)$$

4.2.1.3 질량이동장치를 이용한 피치각제어

질량이동장치는 무인잠수정의 내부에 이동이 가능한 질량체를 두고, 잠수정의 전/후로 이동이 가능하여 피치각을 제어하는데 사용된다. 피치각 제어는 다음 식(4-8)을 이용한다.

$$U_q = -K_{qp}(\theta_d - \theta) + K_{qi} \int (\theta_d - \theta)dt + K_{qd}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (4-8)$$

이 때의 질량이동장치의 구동 모터 전압은 다음 식(4-9)와 같다.

$$V_{pitch} = U_q \quad (4-9)$$

식(4-9)의 구동모터 전압을 인가받아 질량물의 위치를 이동시켜 무인잠수정의 자세(피치각)를 변화시킨다.

4.2.2 퍼지-PID 제어기

PID제어기는 간단한 구조, 쉬운 설계, 그리고 비용대비 높은 성능만족도를 가지고 있으며, 선형성이 강한 시스템의 경우 쉽게 설계 가능한 장점이 있다. 그러나 시스템들의 규모가 점점 커지고 복잡해짐에 따라 비선형성이 강해지며 이러한 시스템에서는 고정된 이득을 갖는 일반 선형제어기를 이용해서 제어를 하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 기존의 PID 제어기의 단점을 보완하기 위하여 퍼지규칙을 이용하여 제어기의 계인을 자동조절하게 하는 퍼지-PID 제어기를 설계하였다.

4.2.2.1 퍼지제어의 개요

퍼지제어기(Fuzzy controller)는 조작자의 프로세서에 대한 지식과 경험을 바탕으로 인간판단 등의 애매성을 포함하는 제어 전문지식을 언어적 제어 규칙으로 표현하고, 퍼지 추론을 이용해서 컴퓨터에서 실행 될 수 있도록 한 것이다. 퍼지이론은 1965년 미국 버클리 대학의 L. A. Zadeh 교수가 “Fuzzy sets” 논문을 발표하면서 시작되었다(Zadeh, 1965). 초기에는 크게 주목받지 못했으나, 1970년대 들어서 일본, 유럽 등에서 퍼지이론에 대한 연구가 활발해지고 1980년대 들어 급속히 퍼지기 시작했다. 퍼지 제어기는 1979년 Mamdani에 의해 최초로 스팀엔진 제어에 적용되었다. 퍼지제어기는 미지의 오차 입력값이 들어오면 정량적인 값으로 바꾸어 여러 절차를 거쳐 프로세스를 제어할 수 있는 제어값을 결정한다. 다음 Fig. 4.7은 퍼지제어기의 일반적인 구조 이다. 퍼지 제어기는 퍼지화(Fuzzification), 퍼지규칙(Fuzzy Rule Base), 퍼지 추론(Fuzzy Inference) 및 비퍼지화(Defuzzyfication)로 구성된다.

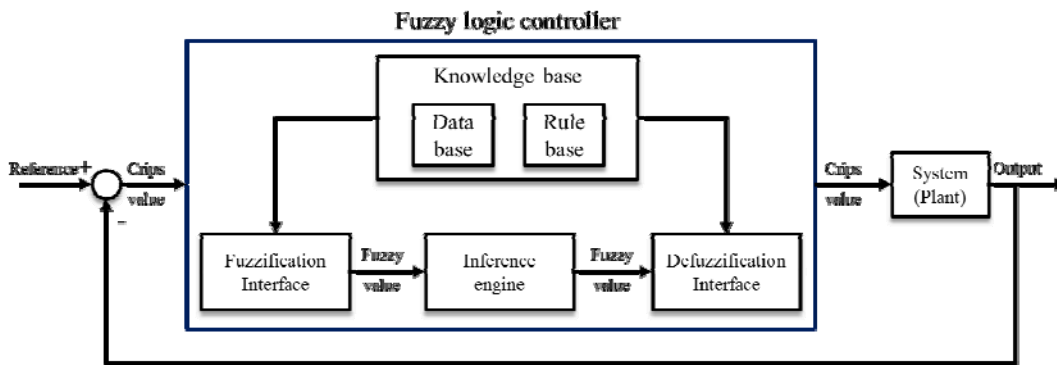


Fig. 4.7 Basic structure of a fuzzy logic controller

퍼지화(Fuzzification)는 일반적인 물리량을 퍼지 집합으로 표현해 주는 과정이다. 제어를 수행하기 위해서는 제어대상과 제어대상으로부터 관측된 값이 있어야 한다. 이때의 값은 항상 하나의 값으로 측정되는데 퍼지 제어기에서는 퍼지 집합 이론을 기본으로 추론을 수행하기 때문에 이를 처리하기 위해 관측된 값을 퍼지 집합으로 만드는 과정이 필요하며, 이 과정을 퍼지화라고 한다. 이 때, 각 집합의 원소들의 소속정도를 계산해주는 함수를 소속함수(Membership Function)라 한다.

다음 단계인 퍼지 규칙(Fuzzy Rule Base)는 제어 대상에 대한 지식과 제어 규칙들이 정의되어 있다. 퍼지 제어 규칙을 정의하는 방법에는 전문가의 경험과 지식에 근거한 방법, 조작자의 제어기능을 추출하는 방법, 플랜트의 퍼지 모델에 의한 방법, 자체 학습기능을 부여하는 방법 등이 있으며 If-Then 문으로 구성되어 있다. 이처럼 퍼지 제어기가 다른 제어기에 비해 가지는 큰 장점이 바로 시스템의 특성을 잘 알지 못해도 어느 정도의 기본적인 규칙을 이용하여 설계에 적용할 수 있다는 점이다. 퍼지 추론방식은 Mamdani 방식과 Sugeno 방식 두 종류가 있다. 두 추론방식의 조건문의 앞부분은 일치하지만, 뒷부분에 차이가 있다. Sugeno 방식에서 출력변수에 대한 소속 함수는 상수 혹은 선형식으로 표현되기 때문에 일반 Mamdani 방식과는 차이가 있다.

Mamdani 방식과 Sugeno 방식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

Mamdani 추론방식 : If x is A and y is B , then z is C

Sugeno 추론방식 : If x is A and y is B , then $z=ax+by+c$

여기서, x , y 는 조건부의 앞부분인 전건부 변수(antecedent variable)를 z 는 조건문의 뒷부분인 후건부 변수(consequent variable)를 의미하며, A , B 는 퍼지 집합을 나타낸다. c 는 Mamdani 방식에서 출력변수에 대한 소속함수를 나타내며, $ax+by+c$ 는 Sugeno 방식에서 출력함수를 선형식으로 표현한 것이다.

의사결정(Interface)단계는 퍼지 입력 변수를 받아서 퍼지규칙을 바탕으로 퍼지 출력 변수로 전환하는 과정이다.

비퍼지화(Defuzzyfication)는 실제로 퍼지 추론 결과가 시스템을 제어하는데 사용되기 위해서 플랜트의 입력으로 사용하기 위해 일반적인 물리량으로 변환되는 과정을 비퍼지화라고 한다. 비퍼지화 단계에서는 다음과 같은 작업들이 수행된다.

- ① 출력된 퍼지 출력 값을 실제 제어 입력의 전체 집합에 맞추어 크기를 변환시킨다.
- ② 출력의 비퍼지화를 수행한다. 즉 출력된 퍼지 값은 제어 플랜트의 입력으로 바로 사용이 불가하므로 비퍼지화 값으로 변환 시킨다.
- ③ 비퍼지화 방법은 최대값 방법(Max criterion method), 최대평균법(Mean of maximum method), 무게중심법(Center of area method)이 있다.

퍼지제어기를 설계하는데 있어서 중요한 것은 제어기의 입·출력 변수의 선정, 입·출력공간의 퍼지 분할, 소속 함수의 선택, 그리고 제어 규칙을 설계하는 것이다. 하지만, 퍼지제어기를 설계하는데 정확한 방법과 절대적인 기준이 없기 때문에 설계자의 지식과 경험이 결과에 많은 영향을 미치게 된다.

4.2.2.2 퍼지-PID 제어기 설계

퍼지제어는 Fuzzy inference rule에 의해 제어기의 성능이 결정되며, 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있지만 비선형적이고 복잡한 동적 특성의 변화를 지닌 시스템에 적용될 수 있다. 따라서 기존의 PID 제어기보다 강인한 제어기라 할 수 있다. Fig. 4.8은 PID 제어기의 계인을 퍼지규칙을 이용하여 자동조절하게 하는 퍼지-PID 제어기의 구성을 보여주고 있다.

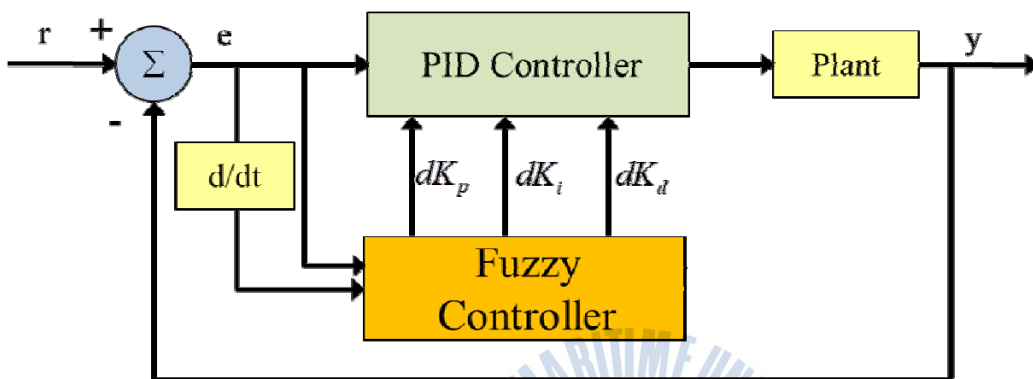


Fig. 4.8 Block diagram of Fuzzy-PID Controller

본 연구에서는 여러 가지 퍼지 제어방식 중 본 연구에서는 경험적 근거를 바탕으로 퍼지 추론을 하였으며 퍼지 논리와 설계된 PID를 조합하는 방법으로 제어기를 설계하였다. 제어 대상에 따라 입력변수와 출력변수들의 소속함수 (Membership function)를 Fig. 4.9 ~ Fig. 4.14와 같이 설정 하였다.

퍼지집합 e, \dot{e} 은 Fig. 4.9 ~ Fig. 4.12에 나타난 것과 같이 NB(Negative Big), NS(Negative Small), PS(Positive Small), PB(Positive Big), N(Negative), S(Small), P(Positive), Z(Zero)의 Member를 갖고 있다.

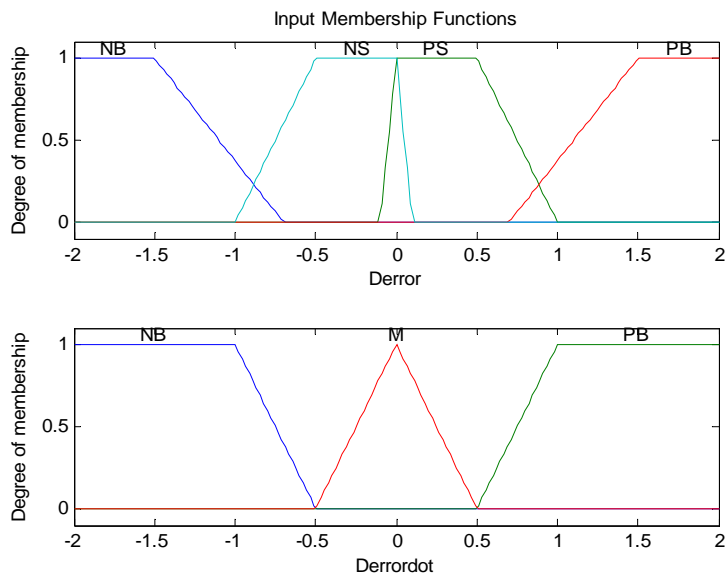


Fig. 4.9 Input membership function for Depth e, \dot{e}

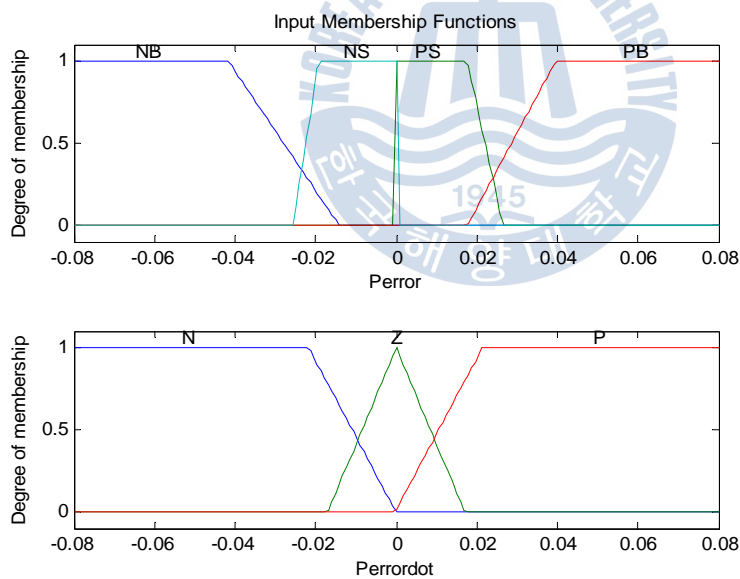


Fig. 4.10 Input membership function for Pitch e, \dot{e}

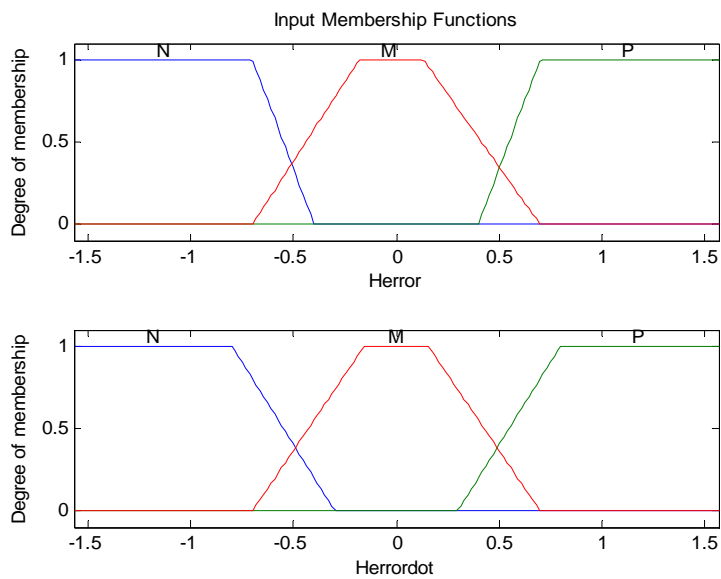


Fig. 4.11 Input membership function for Heading e, \dot{e}

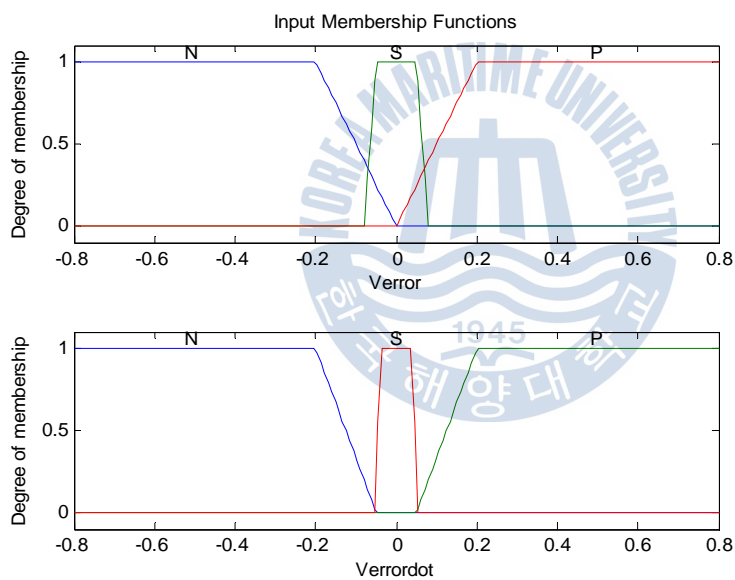


Fig. 4.12 Input membership function for Velocity e, \dot{e}

출력이 되는 PID 게인 값에 대한 소속 함수는 Fig. 4.13 ~ Fig. 4.16에 나타나 있다. 출력은 각 제어대상의 PID 제어기의 게인값이며, S(Small), M(Medium), B(Big), NB, PB의 멤버를 가진다. 퍼지집합이 결정되면 각 멤버들을 이용하여 퍼지 제어규칙을 만들게 된다. 퍼지 제어규칙은 제어기를 설계하는 사람의 경험적 지식을 기초로 하여 만들어진다.

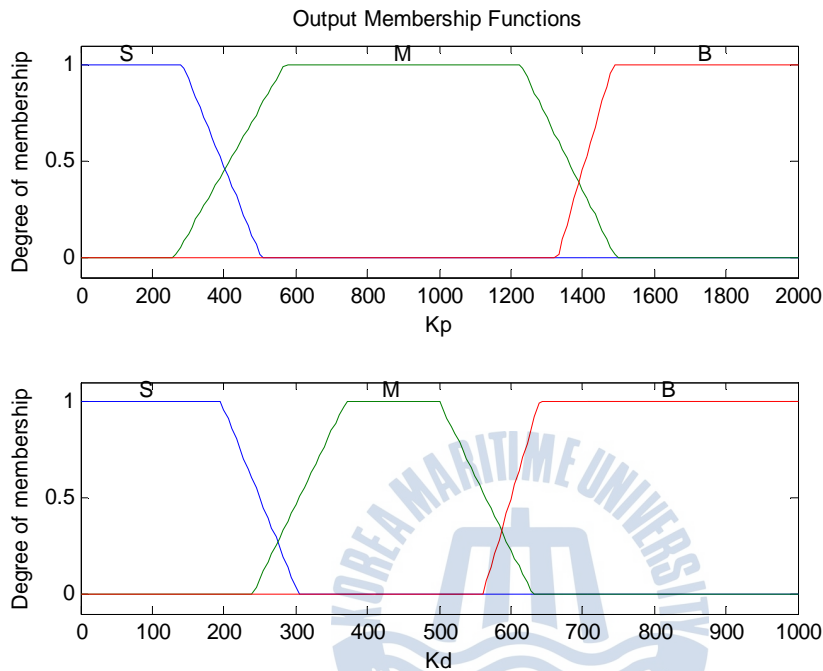


Fig. 4.13 Output membership function for depth control gain K_p, K_d, K_i

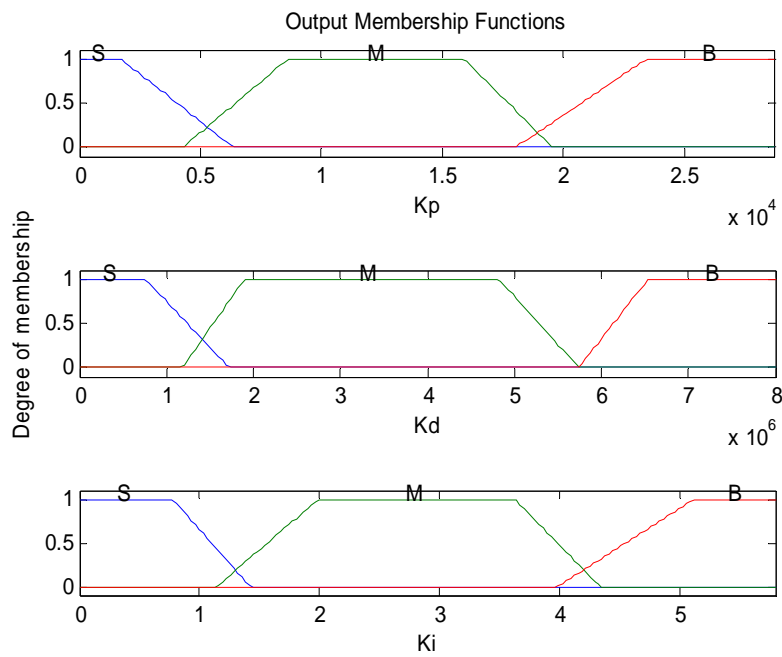


Fig. 4.14 Output membership function for pitch control gain K_p , K_d , K_i

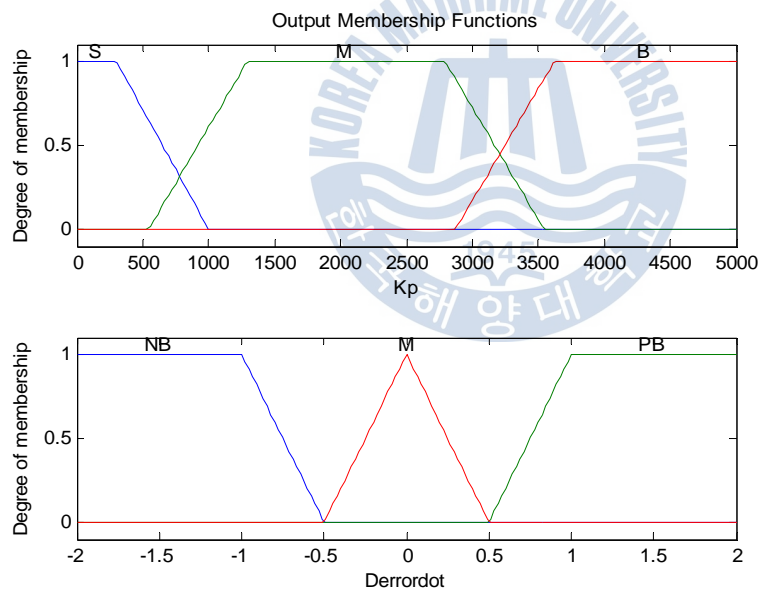


Fig. 4.15 Output membership function for heading control gain K_p , K_d

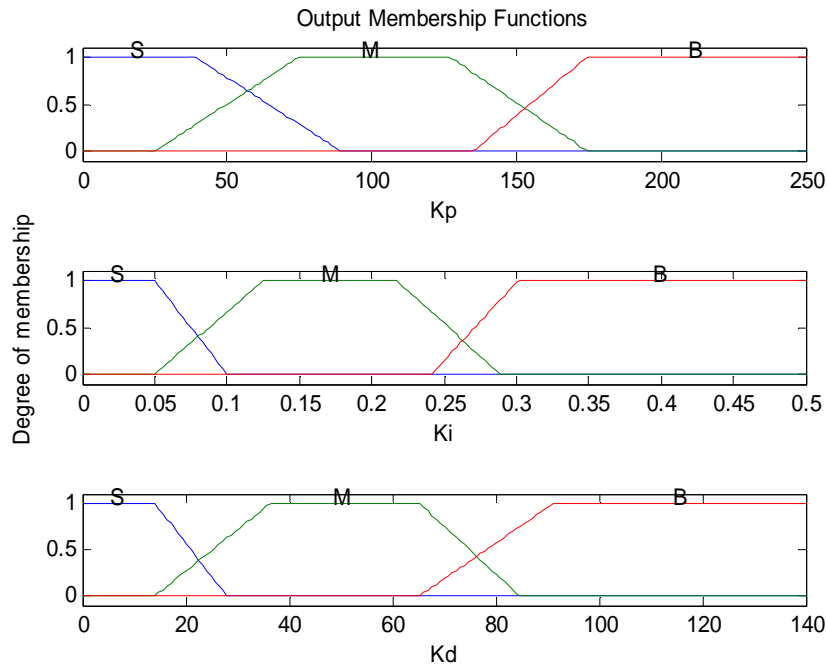


Fig. 4.16 Output membership function for velocity control gain K_p, K_d, K_i

퍼지 제어규칙은 (If - then -) 형식으로 표현되며 경험과 반복적인 학습을 통해 결정된다. 본 연구에서 사용되는 퍼지 제어규칙을 기술하면 다음 Table. 4.2 ~ Table. 4.11과 같다. 퍼지 추론은 여러 가지 퍼지 규칙들과 주어진 입력 값으로부터 하나의 결론을 이끌어 내는 부분이다. 추론 법은 일반적으로 Mamdani가 제안한 Minimum 연산을 이용한 추론법이 이용되며, 본 연구에서도 이 방법을 사용하였으며 비퍼지화된 출력 식은 다음 식(4-10)과 같이 정의된다.

$$dU = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i) \times w_i}{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i)} \quad (4-10)$$

여기서, n 은 퍼지제어 규칙의 수, w_i 는 멤버의 최대값 그리고 $\mu_{output}(w_i)$ 는 멤버의 소속정도를 나타낸다.

Table 4.2 Fuzzy control rules for depth gain K_p

$\begin{matrix} \cdot \\ e \end{matrix}$	N	M	P
NB	M	M	M
NS	B	M	B
PS	M	M	M
PB	B	B	B

Table 4.3 Fuzzy control rules for depth gain K_d

$\begin{matrix} \cdot \\ e \end{matrix}$	N	M	P
NB	M	S	M
NS	M	M	M
PS	B	M	B
PB	B	M	B

Table 4.4 Fuzzy control rules for pitch gain K_p

$e \backslash \dot{e}$	N	Z	P
NB	B	B	B
NS	M	M	B
M	M	M	
PS	B	B	B

Table 4.5 Fuzzy control rules for pitch gain K_i

$e \backslash \dot{e}$	N	Z	P
NB	M	B	M
NS	M	M	M
M	M	M	M
PS	M	B	M

Table 4.6 Fuzzy control rules for pitch gain K_d

$e \backslash \dot{e}$	N	Z	P
NB	B	M	B
NS	M	M	M
M	M	M	M
PS	B	M	M

Table 4.7 Fuzzy control rules for heading gain K_p

$e \backslash \dot{e}$	N	S	P
N	B	B	B
M	M	M	M
P	B	B	B

Table 4.8 Fuzzy control rules for heading gain K_d

$e \backslash \dot{e}$	NB	NS	PS
NB	B	M	B
NS	B	M	B
PS	B	M	B

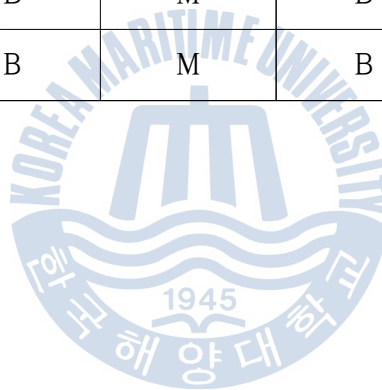


Table 4.9 Fuzzy control rules for velocity gain K_p

$e \backslash \dot{e}$	N	S	P
N	B	M	B
S	M	M	M
P	M	M	M

Table 4.10 Fuzzy control rules for velocity gain K_i

$e \backslash \dot{e}$	N	S	P
N	M	M	M
S	M	M	M
P	M	B	B

Table 4.11 Fuzzy control rules for velocity gain K_d

$e \backslash \dot{e}$	N	Z	P
N	B	B	B
Z	B	M	B
P	B	B	B

4.3 경로 추종 시뮬레이션

무인잠수정의 운동성능 및 제어기의 성능을 확인하기 위하여 설계된 PID와 퍼지 PID제어기의 속도, 방향각, 심도, 피치각에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 통합 운용 성능을 확인하기 위한 경로추종 시뮬레이션을 수행하였다. 설계된 무인잠수정은 기뢰를 제거하기 위하여 모함에서 출발하여 목표지점까지 이동해야 하기 때문에 최소의 경유점을 이용하여 출발지점부터 목적지까지 이동하여야 한다. 본 논문에서는 기본적인 경로추종 방법인 LOS(Line-of Sight)방법을 이용한 경유점 제어를 수행하였으며, 설계된 퍼지 PID 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 조류를 외란으로 주어 시뮬레이션을 수행하였다.

4.3.1 시뮬레이션 조건

무인잠수정이 주어진 경유점(Way-point)를 찾아가기 위해서는 현재 위치와 목표점의 위치를 이용하여 경로를 설정한다. 본 연구에서는 수평면 운동과 수직면 운동에 대하여 각각 LOS 방법을 이용하여 경로점 추종 시뮬레이션을 수행하였다(Marco and Healey, 2001).

4.3.1.1 방향각 추종 방법

수평면 운동에서의 경로추종 방법은 다음의 Fig. 4.16과 같다. 무인잠수정이 주어진 경유점($X_{wp(i-1)}, Y_{wp(i-1)}$)에서 목표경유점(X_{wp}, Y_{wp})으로 이동하는 경우 무인잠수정의 총 이동거리는 다음의 식(4-11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_i = \sqrt{\bar{X}_{wp(i)}^2 + \bar{Y}_{wp(i)}^2} \quad (4-11)$$

여기서 $L_i \neq 0$ 이고, $\bar{X}_{wp(i)} = X_{wp(i)} - X_{wp(i-1)}$, $\bar{Y}_{wp(i)} = Y_{wp(i)} - Y_{wp(i-1)}$ 이다.

이 때 이동간 이탈거리(Cross-track-error)를 최소화 하기 위해서 다음 목표점까지의 경로상에 목표점을 지정하도록 목표벡터의 길이(Δ)를 설정하여 추종하는 방법을 사용한다. 현재 잠수정의 위치에서 다음 경유점까지의 길이 벡터(d_{wp}, s_{wp})는 다음 식(4-12), 식(4-13)으로 표현 할 수 있다.

$$d_{wp}(t) = \sqrt{\tilde{X}(t)^2 + \tilde{Y}(t)^2} \quad (4-12)$$

$$s_{wp}(t) = [\tilde{X}(t) \ \tilde{Y}(t)] \begin{bmatrix} \bar{X}_{wp} \\ \bar{Y}_{wp} \end{bmatrix} \bigg/ L_i \quad (4-13)$$

위 식에서 $\tilde{X} = X_{wp(i)} - \hat{x}(t)$, $\tilde{Y} = Y_{wp(i)} - \hat{y}(t)$ 이다. 식(4-12), (4-13)의 두 벡터가 이루는 각($\delta_p(t)$)은 다음의 식 (4-14)로 표현 할 수 있다.

$$\delta_p(t) = \beta_i - \text{atan2}(\tilde{Y}_{wp} \tilde{X}_{wp(i)}) \quad (4-14)$$

위 식에서 $\beta_i = \text{atan2}(\bar{Y}_{wp(i)} \bar{X}_{wp(i)})$ 이고, 이탈거리($\epsilon(t)$)는 다음 식(4-15)로 표현된다.

$$\epsilon(t) = d_{wp}(t) \sin(\delta_p(t)) \quad (4-15)$$

Fig. 4.17에서 목표 이동 경로상의 LOS-point 인 $(x_{los}(t), y_{los}(t))$ 는 다음 식 (4-16)으로 계산된다.

$$\begin{aligned} x_{los}(t) &= \cos(\psi_d(t))\Delta + \hat{x}(t) \\ y_{los}(t) &= \sin(\psi_d(t))\Delta + \hat{y}(t) \end{aligned} \quad (4-16)$$

방향각 추종제어 알고리즘에서 벡터 d_{wp} , s_{wp} 가 각각 Δ , 0 보다 작거나 같은 경우에는 LOS-point는 다음 경유점이 된다. 그리고, Δ 가 작을 경우에는 이탈거리가 증가하는 경우가 발생하므로 무인잠수정에 적합한 값을 설정해 주어야 한다.

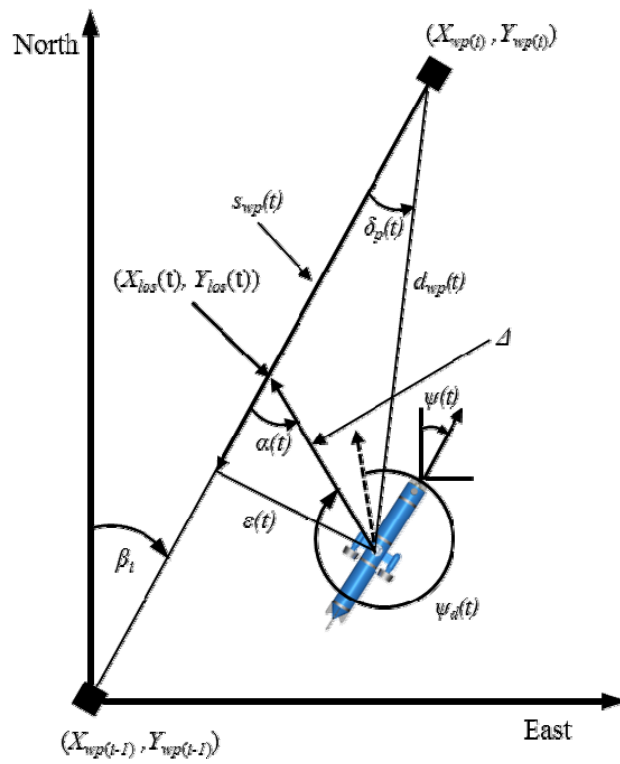
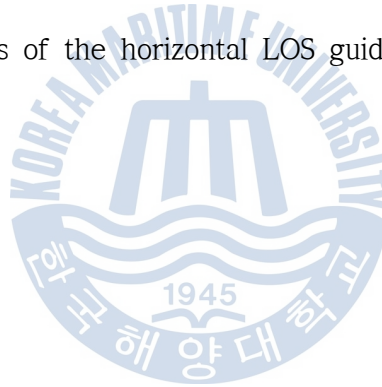


Fig. 4.17 The kinematics of the horizontal LOS guidance system



4.3.1.2 피치각 추종 방법

무인잠수정의 피치각 추종을 위한 수직면 운동에서의 LOS 방법은 Fig. 4.18과 같다.

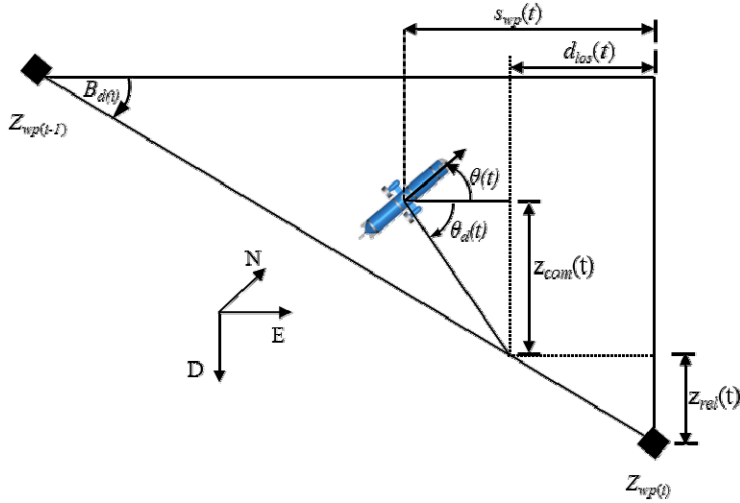


Fig. 4.18 The kinematics of the vertical LOS guidance system

두 경유점 사이의 피치각($\beta_{d(i)}$)는 식(4-17)과 같고 두 경유점 사이의 다음 목표점의 거리는 식(4-18)로 표현된다.

$$\beta_{d(i)} = \text{atan2}(Z_{wp(i)} - Z_{wp(i-1)}, L_i) \quad (4-17)$$

$$d_{los}(t) = \sqrt{(X_{wp(i)} - x_{los}(t))^2 + (Y_{wp(i)} - y_{los}(t))^2} \quad (4-18)$$

Fig. 4.19에서 보듯이 목표 피치각 $\theta_d(t)$ 는 식 (4-19)로 계산 할 수 있다.

$$\theta_d(t) = -\text{atan2}(z_{com}(t), s_{wp}(t) - d_{los}(t)) \quad (4-19)$$

위 그림에서 현재위치에서 LOS point까지의 심도차이와 다음 경유점까지의 심도 차이는 다음과 같다.

$$z_{rel}(t) = \frac{Z_{wp(i)} - Z_{wp(i-1)}}{L_i} d_{los}(t) \quad (4-20)$$

$$z_{com}(t) = Z_{wp(i)} - z_{rel} - z(t)$$

4.4 경로추종 시뮬레이션 결과

설계된 퍼지-PID 제어기를 이용한 시뮬레이션을 통해 잠수정의 운동과 제어기의 성능을 확인하였다. 경로추종 시뮬레이션은 퍼지-PID제어기를 이용하여 제어기 성능을 검증하는 시뮬레이션을 수행하였다.

퍼지-PID 제어기는 오버슈트, 정상상태오차 등을 비교했을 때, 일반적인 PID 제어기보다 좋은 성능을 나타내지만 퍼지 제어규칙 또는 Membership Function에 따라 제어성능에 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

4.4.1 퍼지-PID 제어기를 이용한 경로추종 시뮬레이션

설계된 퍼지-PID의 성능을 검증하기 위해 경로추종 시뮬레이션을 수행하였다. 무인잠수정의 이동 경로는 다음의 Fig. 4.19와 같이 실제 기뢰 제거를 위해 무인잠수정이 운용된다는 가정 하에 설정하였으며, 모함에서 진수되어 안전거리만큼 이격된 거리에서 기뢰를 제거하는 경우에 대하여 경로를 설정하였다. 경로는 초기 진수 후 깊이방향으로 먼저 이동하게 되며, 이때 방향각은 변화하지 않고 깊이방향으로 먼저 빠르게 이동한 후 조류의 영향이 적은 구역에서 방향전환을 통해 목표점으로 이동하는 경로를 설정하였다. 다음 Fig. 4.19와 같이 시작점에서 두 개의 경유점을 통과하도록 하는 시뮬레이션을 수행하였다.

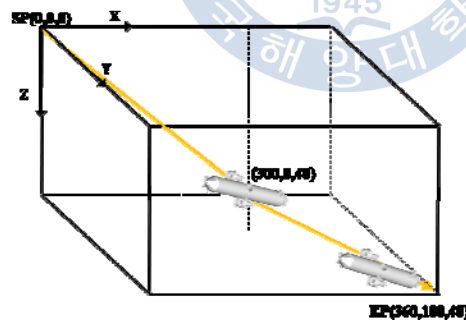


Fig. 4.19 Desired way-point for trajectory tracking

다음 Fig. 4.20은 위의 경로를 실제 무인잠수정이 이동한 경로를 나타내고 있다. 초기 위치에서 두 개의 경유점을 통과하는 경우이고, 잠수정은 첫 번째 경유점까지 이동할 때 먼저 목표수심을 만족하도록 수심방향으로 이동하여 첫 번째 경유점을 통과하고, 방향전환을 하면서 최종 목표점인 두 번째 경유점으로 이동하게 된다. 아래 그림에서 파란색 실선이 실제 무인잠수정이 이동한 경로이며, 초기에 첫 번째 경유점에 해당하는 심도로 이동한 후 경유점으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

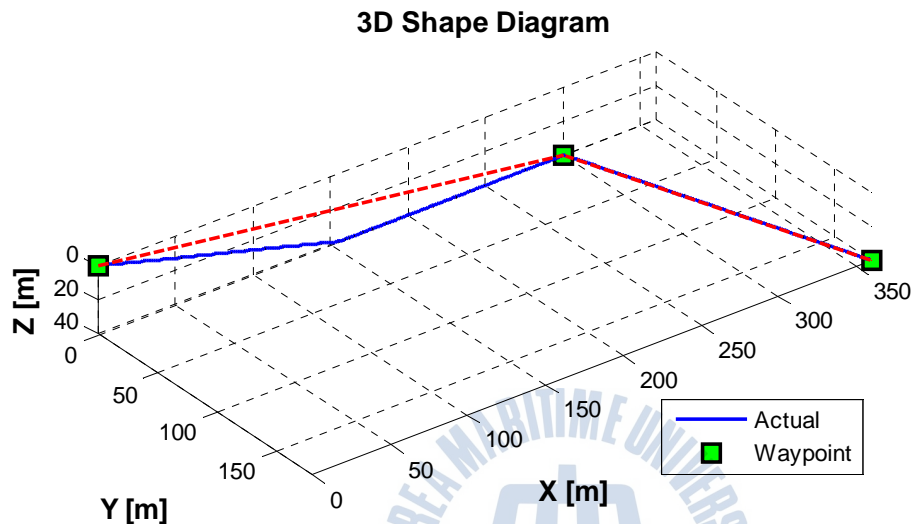


Fig. 4.20 Simulation results through trajectory tracking(3D)

시뮬레이션은 앞 장에서 설계된 퍼지-PID를 적용하였고, 경로추종은 LOS방법을 적용하였다. 위와 같은 경로를 추종하는 시뮬레이션을 하는 동안의 무인잠수정의 속도와 자세, 추력, 질량이동장치의 이동거리 등을 다음의 Fig. 4.21 ~ Fig. 4.26에 나타내었다. 무인잠수정의 이동 속도는 1m/s로 고정하여 이동하도록 하였고, 추진기와 질량이동장치의 최대값은 역시뮬레이션을 통해 구한 최대값의 범위를 적용하였다.

Fig. 4.21은 속도제어 결과를 보여주고 있으며, 직진방향(surge) 목표 속도인 1m/s를 유지하는 것을 확인 할 수 있으며, 초기에는 정지상태에서 발생하는 추력의 영향으로 오버슈트가 발생하고, 첫 번째 경로점 통과 후 두 번째 경로점으로 이동할 때에 변침하는 과정에서 직진방향 속도(u)가 변하는 것을 확인할 수 있다.

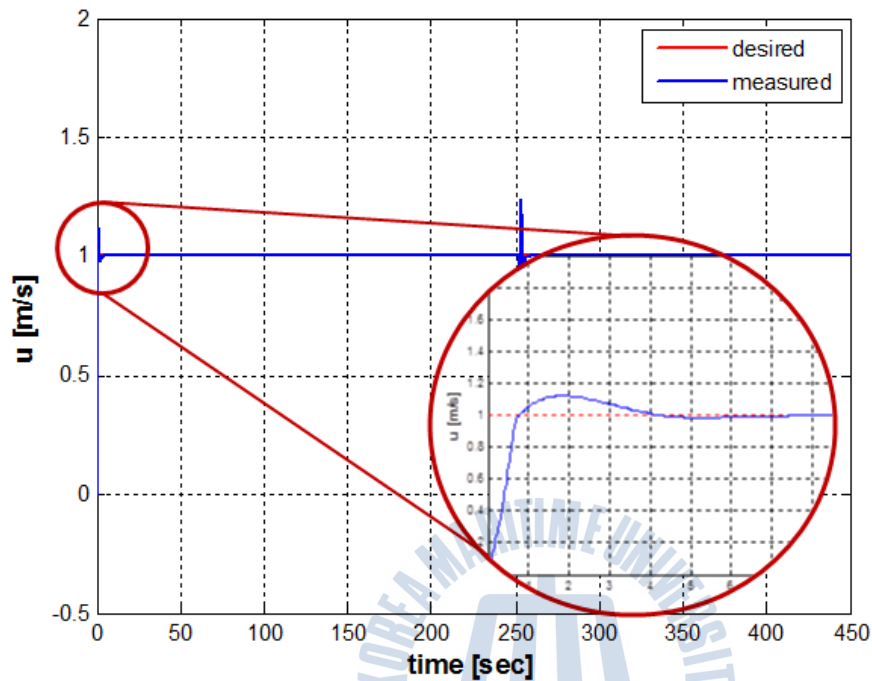


Fig. 4.21 Simulation results through trajectory tracking(velocity)

Fig. 4.22는 시뮬레이션 동안의 심도변화를 보여주는 그래프이다. 시뮬레이션 시작 후 150초 후 목표심도에 도달하고 있으며, 약간의 오버슈트가 있지만 목표 심도를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 목표심도는 질량이동장치와 수직추진기 두 개의 입력을 제어에 사용하고 있으며, 초기 이동시에는 질량이동장치의 이동에 의한 피치각 변화를 주로 이용하여 목표심도로 이동하고 수직추진기는 보조적인 역할을 하게 된다. Fig. 4.23은 피치각 변화에 대한 결과그래프이고, Fig. 4.24는 피치각 변화를 위한 질량이동장치의 이동을 보여주고 있다. 피치각은 목표심도를 이동하기 위해 최대 30° 까지 변화도록 설정하였고, 그림에서처럼 주어진 목표 피치각을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 피치각 변화를 위해서 변하는 잠수정 내부의 질량이동장치의 이동거리는 Fig. 4.24에서 확인할 수 있으며, 피치각 변화에 따라 전/후 약 15cm 썩 이동하고 있다.

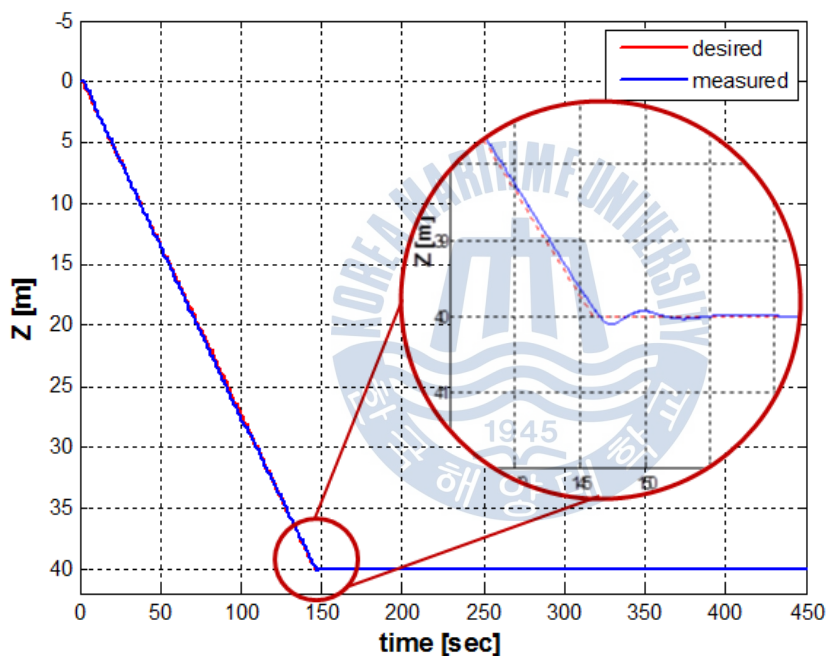


Fig. 4.22 Simulation results through trajectory tracking(depth)

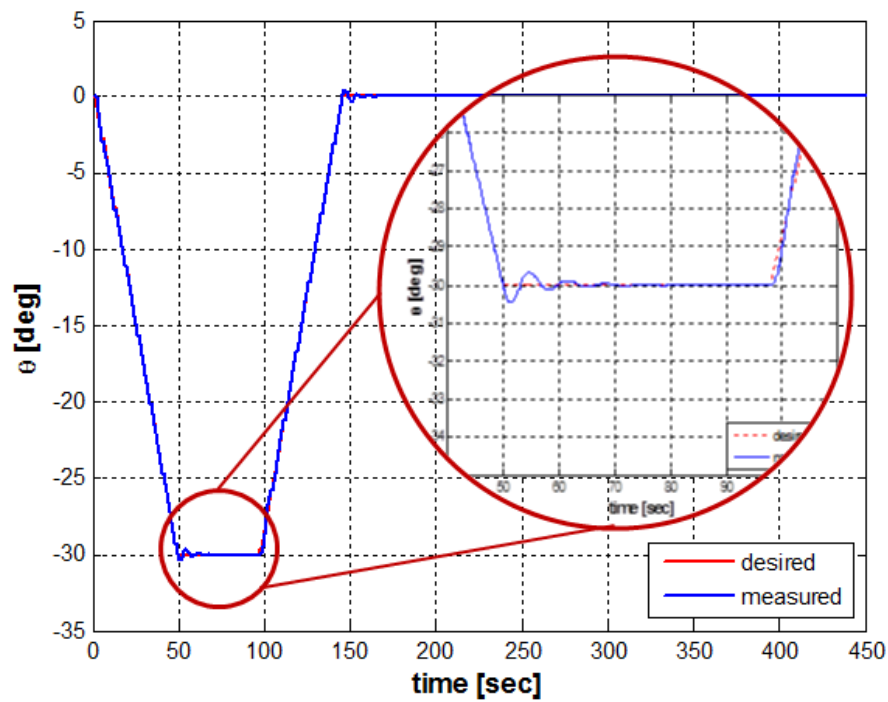


Fig. 4.23 Simulation results through trajectory tracking(pitch)

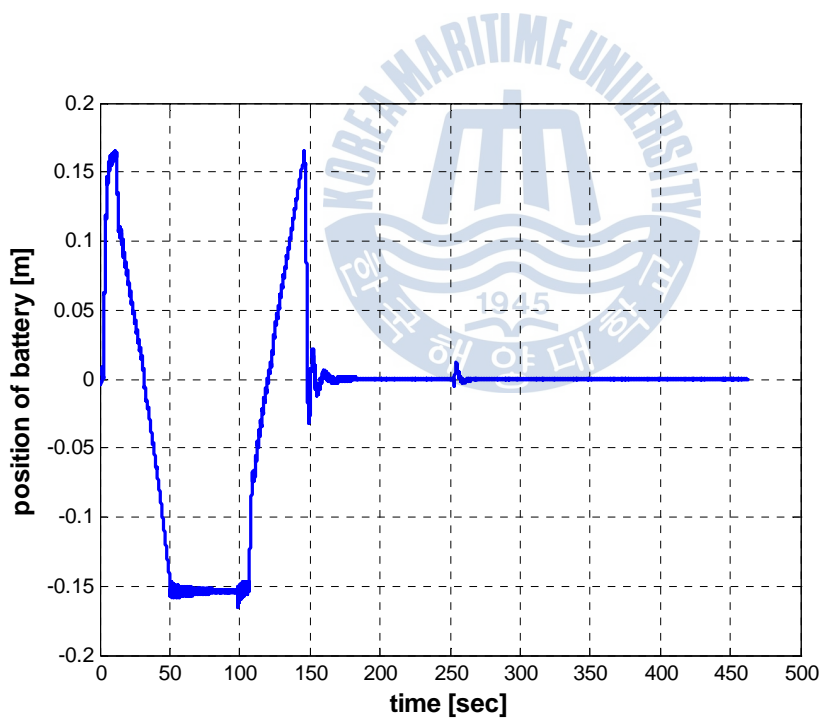


Fig. 4.24 Simulation results through trajectory tracking(mass position)

Fig. 4.25는 방향각 변화를 보여주는 결과그래프이다. 원점에서 출발한 잠수정이 첫 번째 경유점까지는 방향각 변화 없이 수심방향으로 이동하고, 첫 번째 경유점 통과 후에 다음 경유점까지 방향전환을 하면서 이동하는 운동을 하게 된다. 약 250초경에서 우현방향으로 60° 도 방향전환을 한다. 이 때 선체 좌우의 추진기를 이용하여 빠르게 방향전환을 하게 되고, 약간의 오버슈트가 발생하지만 약 2초 후 정상상태에 도달하는 것을 확인 할 수 있다.

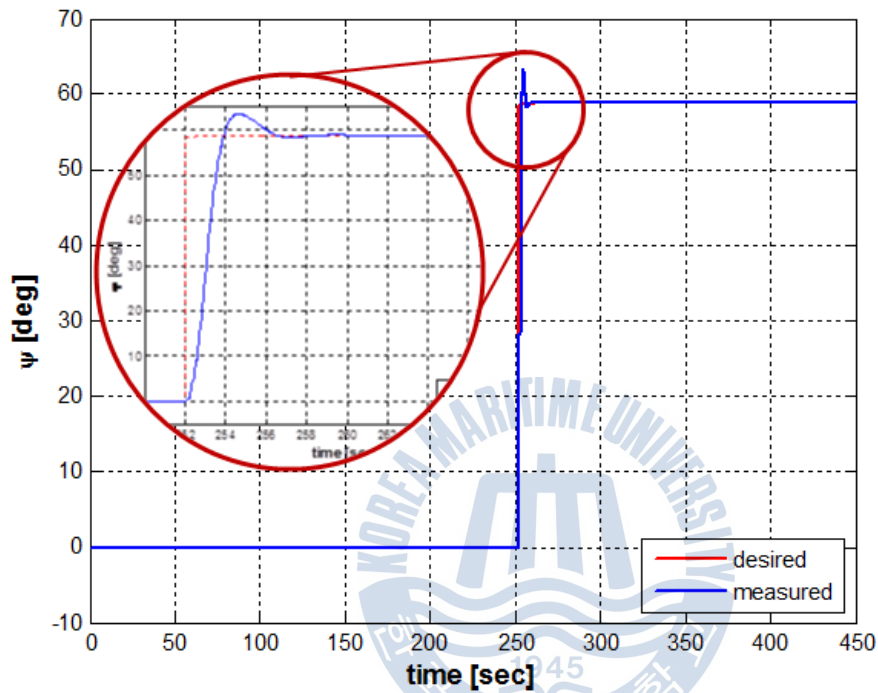


Fig. 4.25 Simulation results through trajectory tracking(heading)

Fig. 4.26은 시뮬레이션이 진행되는 동안의 좌/우 추진기와 수직추진기의 추력 그래프이다. 초기에 무인잠수정이 정지상태에서 이동하는 경우에 선체 좌우의 추진기가 최대의 추력을 발생시키고 있으며, 방향전환 시에도 순간적으로 최대의 추력을 이용하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 수직추진기는 피치각의 변화에 따라서 추진기를 이용하여 목표심도를 유지하기 위한 추력을 발생시키고 있음을 확인하였다.

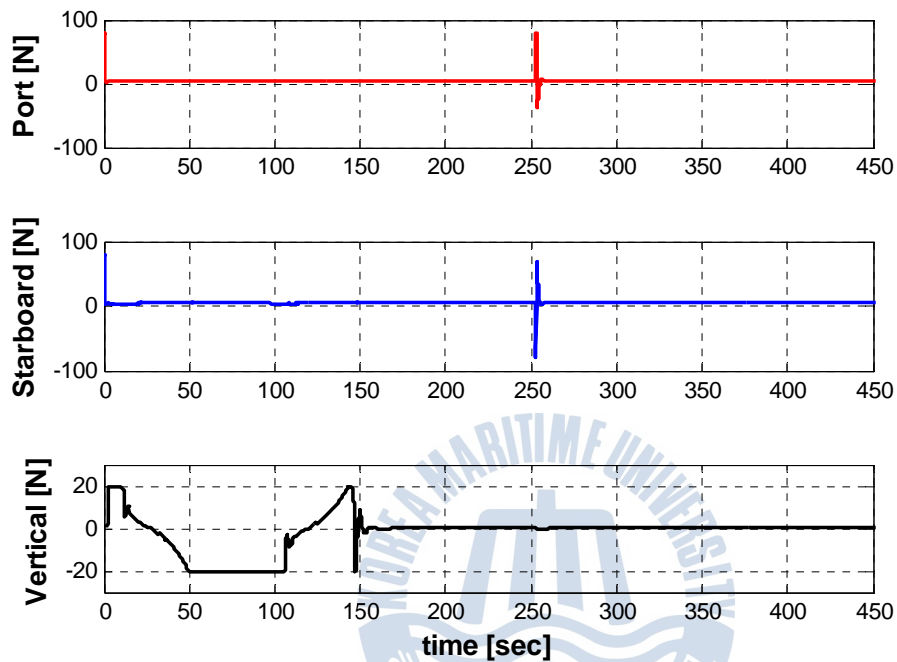


Fig. 4.26 Simulation results through trajectory tracking(thrust)

제 5 장 결 론

5.1 결론

본 논문에서는 무인잠수정의 운동성능을 해석하기 위한 방법으로 역동역학을 이용한 역시물레이션 기법을 적용하여 무인잠수정의 추력산정 및 제어기 설계 등에 관한 내용을 다루고 있다. 기존의 일반적인 시물레이션 방법은 주어진 시스템에 대하여 제어입력 값에 대한 시스템의 성능을 확인하는 방법을 사용해왔다. 이 방법을 통해서 시스템과 파라미터의 시간에 따른 성능을 확인하는데 사용되고, 이를 위해 무인잠수정의 수학적모델을 개발하고, 목표경로를 추종하기 위한 제어입력인 추진기, 방향타, 승강타의 입력 값을 계산하기 위한 제어기를 설계하여 운동성능을 해석하게 된다. 이 방법을 이용하면, 에너지 효율적인 측면에서 문제가 발생할 수도 있다. 이를 극복하기 위해 제어입력 최적화, 배터리 최적화 등에 대한 연구도 이루어지고 있으며, 본 논문에서 확인한 방법처럼 역시물레이션을 이용한 경로 및 에너지 최적화에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 역동역학 방법을 이용한 역시물레이션은 주어진 경로를 이동하는 무인잠수정의 에너지 최적화와 입력값 최적화 등에 사용될 수 있으며, 시스템에 최적화된 추진기 설계 및 파라미터 설정에도 이용될 수 있다. 특히 개발된 무인잠수정의 성능 평가를 위한 방법으로도 이용될 수 있다. 특수 목적을 갖는 무인잠수정의 경우 이동 경로가 정해져있고, 이동에 필요한 시간도 정해져 있기 때문에 역시물레이션을 이용한 방법으로 시스템에 대한 성능 평가의 방법으로도 적용이 가능하고 시스템 설계의 초기 단계에서 설계된 시스템을 검증하는 용도로도 사용이 가능하다. 이 방법을 이용하여 무인잠수정의 성능평가 및 시스템 설계단계에서 설계검증을 위한 방법으로서의 적용 가능성을 확인하였다.

본 논문에서는 무인잠수정이 주어진 속도, 방향각, 심도 및 피치각을 따라는

데 필요한 추진기의 용량을 추정하기 위해 역시뮬레이션을 통해 필요 추력을 산정하여 시스템의 설계에 반영하고자 하였고, 이 추정값을 이용하여 최적의 효율로 주어진 경로를 추종하는지 확인하였다. 역시뮬레이션 결과 초기 설계된 시스템의 추진기와 질량이동장치의 설계치에 비해 사용되는 추정치는 약 70%정도 사용되고 있는 것을 확인하였고, 반대로 기 설계된 추진기의 용량 및 질량이동장치의 이동거리를 최대한 활용하면서 실제 운용과 유사한 환경을 이동하는 경우에 대해 시스템의 제어 입력에 대한 성능을 확인하기 위해 퍼지-PID 제어기를 이용하여 경로추종 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 수심방향과 수평방향에서의 목표 값 변화 시에 최대 추력을 이용하면서 약간의 오버슈트가 있지만 주어진 경로를 이동하면서 설계된 추진기와 질량이동장치의 성능을 최대로 활용하면서 목표 경유점을 따라 이동하는 것을 확인하였다.

5.2 추후연구

본 논문에서 확인한 역시뮬레이션 기법을 이용한 잠수정의 성능평가 방법을 정립하여, 잠수정의 초기 설계에 적용할 수 있도록 정확한 모델링을 통한 성능평가 방법 및 절차를 개발하여 개발단계에서 성능을 확인하는 방법을 체계화하여 다양한 종류의 무인잠수정의 성능평가를 위한 방법으로 사용될 수 있도록 적용해나갈 예정이다. 또한, 설계된 무인잠수정이 실제 운용환경과 유사한 환경에서 운용하면서 발생할 수 있는 다양한 외란에 대한 조건이 적용된 시뮬레이션과 제어기 설계를 통해 강인성을 향상 시킬 필요가 있다. 또한 잠수정 개발을 통한 실 해역에서의 성능검증을 통해 시뮬레이션과의 비교를 진행할 예정이다.

참고문헌

- 김동욱, 이경수, 2011. 고속 자율 주행을 위한 장애물 회피 알고리즘. *대한기계학회 2011년도 동역학 및 제어부문 춘계학술대회*, 2011.5, pp.98-104.
- 김선필, 이민형, 2000. 비선형 근골격 모델의 역동역학 해석. *한국체육학회지*, 39(4), pp.688-697.
- 김지훈, 진상록, 김종원, 서태원, 김종원, 2013. 불가사리 채집용 4절 링크 매니플레이터의 최적 설계. *한국정밀공학학회지*, 30(9), pp.961-968.
- 명성식, 2011. 의공학 분야에서의 인간공학을 위한 동역학해석 기술의 활용. *한국CAD/CAM학회 학회지*, 17(1), pp.46-51.
- 박요섭, 이신제, 이용국, 정섬규, 장남도, 이하용, 2012. 수중 글라이더를 이용한 동해 횡단 사례보고. *한국해양학회지*, (17)2, pp.130-137.
- 박인규, 김진걸, 2000. 이족로봇의 동적 보행계획과 역동역학 해석. *한국정밀공학학회지*, 17(9), pp.133-144.
- 서주노, 2010. 무인잠수정을 이용한 기뢰대항전 기술개발 현황. *국방과학기술정보*, 제23호, 2010년 7/8월, pp.171-180.
- 송성재, 2013. 수동 휠체어 추진 중 상지 역동역학 모델. *재활복지공학회논문지*, 7(1), pp. 21-27.
- 신지환, 김동훈, 김찬기, 2011. 강제선회시험을 통한 수중운동체 유체력 계수 추정. *2011 한국군사과학기술학회 종합학술대회*, pp.2164-2167.
- 이기영, 2011. 무인잠수정 기반 기뢰대항전체계 개발을 위한 소요기술 분석. *한국군사과학기술학회지*, 14(4), pp.579-589.
- 이승건, 2011. *선박운동역학*, 부산대학교 출판부

- 이종무, 최현택, 김기훈, 이판묵, 정인식, 서영우, 한상철, 구법모, 2011. 자율항해 무인기뢰처리 시스템 개발 및 시험. *2011년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회*, pp.1806-1809.
- 이충희, 2010. 무인잠수정 시장동향 및 생산전망 분석, International Defense Market Focus:서울, Vol. 3.
- 정태환, Karl Sammut, Fangpo He, 이승진, 2009. CFD 해석을 이용한 덕트형 자율무인잠수정의 운동해석 및 설계 최적화에 관한 연구. *한국해양공학회지*, 23(1), pp.48-53.
- 최중락, 2013. 수중로봇 개발 동향 및 핵심기술. 제어·로봇·시스템학회지, 19(3), pp.29-41.
- M. A. Abkowitz, 1969. *Stability and Motion Control of Ocean Vehicles*, The MIT Press, Cambridge, USA.
- Andrew D. Bowen, Dana R. Yoerger, Chris Taylor, Robert McCabe, Jonathan Howland, Daniel Gomez-Ibanez, James C. Kinsey, Matthew Heintz, Glenn McDonald, Donald B. Peters¹, Barbara Fletcher, Chris Young, James Buescher, Louis L. Whitcomb, Stephen C. Martin, Sarah E. Webster, Michael V. Jakuba¹, 2008. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11,000m depth. *OCEANS 2008*, Quebec City, 15-18 Sept. 2008, pp. 1-10.
- E. A. de Barros, A. Pascoal, E. de Sa, 2008. *Investigation of a method for predicting AUV derivatives*. *Ocean Engineering*, 35(16), pp.1627-1636.
- D. R. Blidberg. 2001. The development of autonomous underwater vehicles (AUV); a brief summary. *ICRA Conference*, Seoul, Korea. [Online] Available at: http://ausi.org/publications/ICRA_01paper.pdf [Accessed 19 Nov. 2014]
- J. Feldman, 1979, *Revised Standard Submarine Equations of Motion*, David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center/SPD-0393-09. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1950. Nomenclature for

- treating the motion of a submerged body through a fluid. Technical Report Bulletin 1-5, New York, USA.
- Thor I. Fossen, 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons: New York.
- M. Gertler, G. R. Hagen, 1967, *Standard Equation of Motion for Submarine Simulations*, Naval Ship Research and Development Center, Report No. 2510.
- A. J. Healey & D. Lienardm, 1993, Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(3), pp.327-339.
- Tae Hwan Joung, 2014. Application of CFD analysis for Predicting the Hydrodynamic Characteristics and Propulsion Performance of an Autonomous Underwater Vehicle, Ph.D. Adelaide, Flinders University.
- P. M. Lee, S. W. Hong, Y. K. Lim, C. M. Lee, B. H. Jeon, J. W. Park, 1999. Discrete-Time Quasi-Sliding Mode Control of an Autonomous Underwater Vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(3), pp.388-395.
- Mai Ba Loc & Hyeung-Sik Choi, 2012. Design of Self-Tuning Gain Depth Controller for an Autonomous Underwater Vehicle with Mass Shifter Mechanism. *12th International Conference on Control, Automation and Systems*, Oct. 17-21, 2012 in ICC, Jeju Island, Korea, 1742-1746.
- A. Menozzi, T. C. Gagliardi and S. E. Lyshevski, 2000. Dynamics and Control of MTV: a Multipurpose Unmanned Underwater Vehicle. *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, IL, pp.70-74.
- Robert A. Petitt, Jr., Andrew Bowen, Robert Elder, Jonathan Howland, Matthew Naiman, 2004. *Power system for the new Jason ROV*. OCEANS '04. MTTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, pp.1727 - 1731.
- J.E.G. Refsnes, 2007. *Nonlinear Model-Based Control of Slender Body AUVs*. Ph.D. Trondheim, NTNU

- G. N. Roberts and R. Sutton, 2006. *Advances in Unmanned Marine Vehicles*. Stevenage, The Institution of Electrical Engineers. United Kingdom.
- H. Stommel, 1989. The Slocum Mission. *Oceanography*, 2(1), pp. 22-25.
- Douglas Thomson and Roy Bradley, 2006. Inverse simulation as a tool for flight dynamics research: Principles and applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 42(3), pp.174-210
- U.S. Navy, 2004. *The Navy Unmanned Undersea Vehicle(UUV) Master Plan*.
- U.S. Navy, 2009. *21ST CENTURY U.S. NAVY MINE WARFARE*, Program Executive Office Littoral and Mine Warfare, [Online] Available at: http://www.navy.mil/n85/miw_primer-june2009.pdf [Accessed 19 Nov. 2014]
- Louis L. Whitcomb and Dana R. Yoerger, 1999. Development, comparison and preliminary experimental validation of nonlinear dynamic thruster models. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 24(4), pp.481-494.
- Louis L. Whitcomb, Andrew D. Bowen, Dana R. Yoerger, Christopher German, James C. Kinsey, Larry Mayer, Michael V. Jakuba, Daniel Gomez-Ibanez, Christopher L. Taylor, Casey Machado, Jonathan C. Howland, Carl Kaiser, Matthew Heintz, 2013. Development of Nereid-UI: A Remotely Operated Underwater Vehicle for Oceanographic Access Under Ice. *9th Annual Polar Technology Conference*, 2-4 April 2013, Maryland.
- William J. Wolkerstorfer, 1995. *A Linear maneuvering model for simulation of slice hulls*. MS. Monterey: Naval Postgraduate School.
- L. A. Zadeh, 1965. *Fuzzy sets*. *Information and Control* 8(3), 338-353.
- 임상전, 1971. 기본조선학, 대한교과서주식회사
- 최중락, 2008. 무인잠수정(UUV) 개발추세 및 핵심기술 분석, 국방과학기술플러스, Vol.65, 2008. 8.
- D. J. Murray-Smith, 2012. Modeling and simulation of integrated systems in

engineering: Issues of methodology, quality, testing and application. WP, Cambridge, UK.

U. S. Navy, 2007. The Navy Unmanned Surface Vehicle(USV) Master Plan.

J. N. Newman, 1977. Marine Hydrodynamics. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England.

J. Yuh, 1995. UNDERWATER ROBOTIC VEHICLES Design and Control. TSI Press:Albuquerque., USA.

Thor. I. Fossen, 2002. Marine Control Systems-Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics:Trondheim, Norway.



감사의 글

학위논문을 마치면서 돌아보니 대학원에 처음 입학할 때가 생각이 납니다. 군 전역 후 대학원에 들어오면서 처음 접하게 된 수중로봇이라는 분야는 제 인생에 있어 아주 커다란 변화를 가지고 온 계기가 되었습니다. 시간을 돌이켜 생각해보면 지난 10년 동안 제 주위에는 많은 변화가 있었습니다. 결혼생활 내내 학생인 남편을 뒷바라지 하느라 힘들었을 아내 현숙이와 주말에는 회사와 학교로 제대로 놀아주지 못하는 아들 우현이를 갖게 되었습니다. 긴 시간 동안 주위 많은 분들의 격려와 도움이 없었다면 오늘의 이 결과는 없었을 거라 생각이 됩니다. 아직은 여러모로 부족하지만 앞으로 더 노력하여 여러분들의 기대에 부응하는 그런 사람이 되겠습니다.

먼저 수중로봇이라는 분야를 처음 알게 해주시고 연구에 아낌없는 격려와 지도를 해주신 김준영 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그동안 항상 옆에서 주신 가르침에 감사드리며 앞으로도 항상 노력하겠습니다. 그리고 바쁘신 중에도 부족한 제 논문의 심사를 맡아주시고, 소중한 충고와 조언을 해주신 한국해양대 최형식 교수님, 유삼상 교수님, 부산대학교 이승건 교수님 그리고 국방과학연구소 최중락 박사님께도 깊은 감사를 드립니다. 또한 제주대학교와 해양대학교에서 학위를 하는 동안 많은 가르침을 주신 학과 교수님들께 감사드립니다. 특히 지금은 떠나 있어 더 생각이 나는 제주대학교 해양시스템공학과 교수님들께 감사드립니다. 그 때의 가르침이 지금의 제가 있는데 밑바탕이 되었습니다. 또한 논문에 많은 도움을 주신 동의대 박일룡 교수님께도 감사드립니다.

학위논문을 준비하면서 특별히 고마운 선박의장설계실험실 식구들은 언제나 큰 힘이 되었습니다. 논문을 준비하면서 많은 도움을 주었던 동희형, 승민, 건석, 동호, 영진이와 제주에서 석사 때 같이 하면서 고생했던 태희, 성협와 남권호, 복태훈, 고혁준 박사님에게도 감사의 말을 전합니다. 일일이 말하기엔 너무나 많은 도움을 받았던 제주대 해양시스템공학과, 해양대 재료공학과 선후배님들께 감사합니다. 그리고 회사 생활하면서 학위논문을 준비하는데 많은 도움을

주시고 지원과 격려를 아끼지 않으셨던 삼성탈레스 해양시스템연구소 손영창 소장님, 박도현 박사님, 배은현 박사님과 이용욱 상무님을 비롯한 여러 선후배, 동료들에게 감사드리며, 지금은 해양대학교에 계시는 서주노 교수님께도 감사드립니다. 논문 준비한다고 정신없이 지낼 때 열심히 뒤에서 일하면서 도와준 김호성, 송영내에게도 감사의 말을 전합니다. 또한, 항상 기도해 주시는 우리 절 인성스님을 비롯한 우리절 식구들에게도 감사드립니다.

마지막으로 학위과정 내내 옆에서 맘 졸이며 고생한 사랑하는 아내에게 가장 큰 감사를 전합니다. 항상 힘이 되어주신 부모님과 사랑하는 딸을 저에게 주신 장인어른과 장모님께도 감사드리고, 사랑하는 동생 지향이와 매제, 처제, 동서들에게도 감사드립니다. 이제는 이러한 가족들의 은혜에 조금이나마 보답할 수 있도록 노력하겠습니다.

이 외에도 너무 많은 분들이 도움을 주셨고, 힘들 때 옆에서 도와주신 분들이 많으나 일일이 언급하지 못해 죄송스럽습니다.

2015년 1월

변승우

마이클 조던이 부상을 안 입는 이유

인생이란 두려움으로 대하거나

방어적으로 다루면 아주 위험해질 수 있다.

마이클 조던은 자신이 부상을 잘 입지 않는 이유는,

절대로 속도를 줄여서 경기를 하지 않기 때문이라고 고백했다.

인생은 전속력으로 부딪치는 사람에게만 아름다운 보상을 해준다.

전속력으로 부딪치며 사는 것이

더 재미있을 뿐만 아니라,

훨씬 안전하다.

- 로저 로젠블라트의 《유쾌하게 나이 드는 법 58》 중에서 -